

**Vergleich zweier intramedullärer Nägel zur
tibiototalcalcanearen Arthrodeese: anatomische und
radiologische Aspekte**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Sebastian Andreas Ullm
geboren am 05.12.1979 in Torgau

Gutachter

1. Prof. Dr. Thomas Mückley, Erfurt
2. Prof. Dr. Dr. Stefan Schultze-Mosgau, Jena
3. Prof. Dr. Markus Walther, München

Tag der öffentlichen Verteidigung: 04.02.2014

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
ant.	anterior
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
CT	Computer - Tomographie
d.h.	das heißt
KD	Kirschnerdraht
Lig.	Ligamentum
M.	Musculus
Mm.	musculi
mean	Mittelwert der gemessenen Abstände
ml	Milliliter
mm	Millimeter
N.	Nervus
Nn.	Nervi
n	Anzahl der anatomischen Strukturen
p	p-Wert (Signifikanzwert)
post.	posterior
R.	Ramus
Rr.	Rami
range	Intervall der gemessenen Abstände
SD	standard deviation (Standardabweichung)
t	tangierte anatomische Strukturen, entspricht 0,00 mm
Tab.	Tabelle
TTCF	tibiototalcalcanearen Fusion
V.	Vena
x	geschädigte anatomische Strukturen

Synonyme:

N. fibularis profundus - N. peroneus profundus

N. fibularis superficialis - N. peroneus superficialis

M. fibularis longus - M. peroneus longus

M. fibularis brevis - M. peroneus brevis

Ramus primus n. plantaris lateralis - Ramus m. abductoris digiti minimi

(auch als N. abductor digiti quinti bzw. Baxter Nerv bezeichnet)

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	2
2.1. Anatomische Grundlagen	2
2.1.1. Regio cruris distalis– topographische Betrachtungen	2
2.1.2. Die Sprunggelenke– topographische Betrachtungen	4
2.1.2.1. Das obere Sprunggelenk	4
2.1.2.2. Das untere Sprunggelenk	6
2.1.3. Regio calcanea – topographische Betrachtungen	7
2.1.4. Planta pedis – topographische Betrachtungen	7
2.2. Grundlagen der Sprunggelenk-Arthrodeese	10
2.2.1. Historischer Überblick der Sprunggelenk-Arthrodeese	10
2.2.2. Indikationen und Kontraindikationen	
zur tibiototalcalcanearen Arthrodeese	12
2.2.3. Die retrograde Sprunggelenksarthrodesenagelung	13
3. Ziele der Arbeit	15
4. Methodik	16
4.1. Untersuchungsgut	16
4.2. Bildgebung	16
4.3. Operatives Vorgehen	17
4.3.1. Operationsanleitung Nageltyp 1	18
4.3.2. Operationsanleitung Nageltyp 2	22
4.4. Anatomische Präparation	25
4.4.1. Relevante anatomische Strukturen	25
4.4.2. Präparationsablauf	27
4.5. Fotodokumentation	32
4.6. Statistische Analyse	32

5. Ergebnisse	32
5.1. Präparatorische Ergebnisse der gefährdeten Strukturen	33
5.1.1. Nageleintrittsstelle	34
5.1.2. Latero-mediale Verriegelung Calcaneus	43
5.1.3. Latero-mediale Verriegelung Talus	50
5.1.4. obere und untere Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes	53
5.1.4.1. Ergebnisse der oberen Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes	53
5.1.4.2. Ergebnisse der unteren Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes	59
5.1.5. Postero-anteriore Verriegelungsschraube Calcaneus	61
5.2. Radiologische Ergebnisse	63
5.2.1. Achsenvermessung	63
5.2.2. Ossäre Führung im Calcaneus	64
 6. Diskussion	 65
 7. Schlussfolgerungen	 72
 8. Literatur- und Quellverzeichnis	 73
 9. Anhang	 81
Ehrenwörtliche Erklärung	81
Danksagung	82
Abbildungsnachweis	83

1. Zusammenfassung

Die retrograde Marknagelung ist ein etabliertes Verfahren für die tibiototalcalcaneare Fusion (TTCF). Die Untersuchungen sollten klären ob sich Veränderungen im Nageldesign auf die Gefährdung anatomischer Strukturen und die knöcherne Einbettung der Nagelbasis im Calcaneus auswirken. In zwei Vorversuchen wurden die gefährdeten anatomischen Strukturen identifiziert. Es wurden sechs unfixierte Beinpaare von verstorbenen Körperspendern nach dem Auftauen verwendet. Im Paarvergleich wurden die Präparate mit zwei unterschiedlichen Marknageldesigns - dem Nageltyp 1 der Firma Biomet; und dem Nageltyp 2 der Firma Stryker - instrumentiert. Anschließend erfolgten computertomographische Untersuchungen zur Bestimmung der Rückfußachse und der ossären Führung des Nagels im Calcaneus. Es folgte die anatomische Präparation potentiell gefährdeter Weichteilstrukturen mit Abstandsmessungen zum Nagel bzw. zu den Verriegelungsschrauben und die Bilddokumentation.

Nach statistischer Auswertung der Daten zeigten sich im Bereich der Nageleinbringstelle signifikant größere Abstände des Nageltyps 2 von der Sehne des M. flexor hallucis longus, der A. plantaris medialis und dem N. plantaris lateralis. Für die Verriegelungsschrauben im Calcaneus ergaben sich signifikante Vorteile für den gebogenen Nageltyp hinsichtlich der Schädigung der Sehne des M. fibularis brevis und des größeren Abstandes des N. plantaris medialis zum geraden Nageltyp. Die Verriegelung im Talus wies signifikant größere Abstände der Sehnen des M. fibularis longus et brevis für den Nageltyp 2 auf. Im Bereich des distalen Tibiaschaftes ergaben sich statistisch signifikante Vorteile für den Nageltyp 2 bezüglich des M. extensor digitorum longus, der A. tibialis anterior, des N. fibularis profundus und des N. fibularis superficialis. Der Nageltyp 1 erzielte signifikant bessere Ergebnisse in Bezug auf die V. saphena magna. Die Auswertung der radiologischen Daten zeigte keine signifikanten Veränderungen in den Rückfußachsen und in der ossären Führung im Calcaneus. Auch fand sich keine relevante Varisierung.

Mit einem gebogenen Marknageldesign kann der Abstand zu den relevanten neurovaskulären Strukturen im Bereich der Fußsohle vergrößert werden. Die Verriegelung im Bereich der Nagelspitze erscheint von medial ausgeführt sicherer, was eine mögliche Begleitverletzung des N. fibularis superficialis et profundus und der A. tibialis anterior betrifft. In Kenntnis der gefährdeten Strukturen kann ein angepasstes chirurgisches Vorgehen Komplikationen bei der TTCF mit dem retrograden Marknagel verringern.

2. Einleitung

2.1. Anatomische Grundlagen

Hinsichtlich der operativen Versorgung mittels eines retrograden Nagels sind anatomische Strukturen des Unterschenkels, des oberen und unteren Sprunggelenks und des Fußes in Betracht zu ziehen.

2.1.1. Regio cruris distalis – topographische Betrachtungen

Die Regio cruris, welche von der Tuberositas tibiae bis zu den Malleolen reicht, ist durch die beiden Röhrenknochen Tibia und Fibula geprägt (Waldeyer und Mayet 1993). Die Tibia übernimmt die tragende Funktion des Unterschenkels, und die Fibula gewährleistet bei intakten anatomischen Verhältnissen eine einwandfreie Funktion des oberen Sprunggelenkes (Debrunner 1994). Eine ungleichmäßige Ausbildung der Muskulatur bedingt an der Tibia eine Disposition der Vorderkante und der medialen Fläche zur weniger schützenden Haut. Durch Tibia, Fibula und die beide Knochen verbindende Membrana interossea sowie fasziale und septale Strukturen werden am Unterschenkel 4 Muskellogen gebildet. Die vordere oder Extensorenloge enthält in unserer Präparation relevanten anatomischen Strukturen, wie den M. tibialis anterior, den M. extensor digitorum longus, den M. extensor hallucis longus und das neurovaskuläre Bündel, bestehend aus den Vasa tibialia anteriora und dem N. fibularis profundus, in der so genannten vorderen Schienbeinstrasse. Die seitliche oder Fibularisloge beinhaltet den M. fibularis longus und den M. fibularis brevis sowie den N. fibularis superficialis, welcher im distalen Drittel des Unterschenkels die Fascia cruris durchbohrt. Der Nerv entlässt unter anderem sensible Äste für den Fußrücken, die Nn. cutanei dorsalis medialis et intermedius. Die oberflächliche Flexorenloge beinhaltet den M. gastrocnemius, den M. soleus und den vom lateralen Gastrocnemiuskopf abgespaltenen M. plantaris. Zusammen werden diese Muskeln auch als M. triceps surae bezeichnet. Die tiefe Flexorenloge enthält den M. popliteus, den M. flexor hallucis longus, den M. flexor digitorum longus und den M. tibialis posterior. An neurovaskulären Strukturen verlaufen in dieser Loge die Vasa tibialia posteriora und der N. tibialis in der so genannten hinteren Schienbeinstrasse, sowie die Vasa fibularia (Van der Elst und Van der Werken 2005). Subkutan verlaufen an der medialen Unterschenkelseite die V. saphena magna und der sie begleitende sensible N. saphenus, ein Endast des N. femoralis. An der lateralen Unterschenkelseite mit der V. saphena parva durchbohrt der N. suralis die Faszie, versorgt

sensibel die Knöchelregion und als N. cutaneus dorsalis lateralis die laterale Fersenengegend und den lateralen Fußrücken (Waldeyer und Mayet 1993).

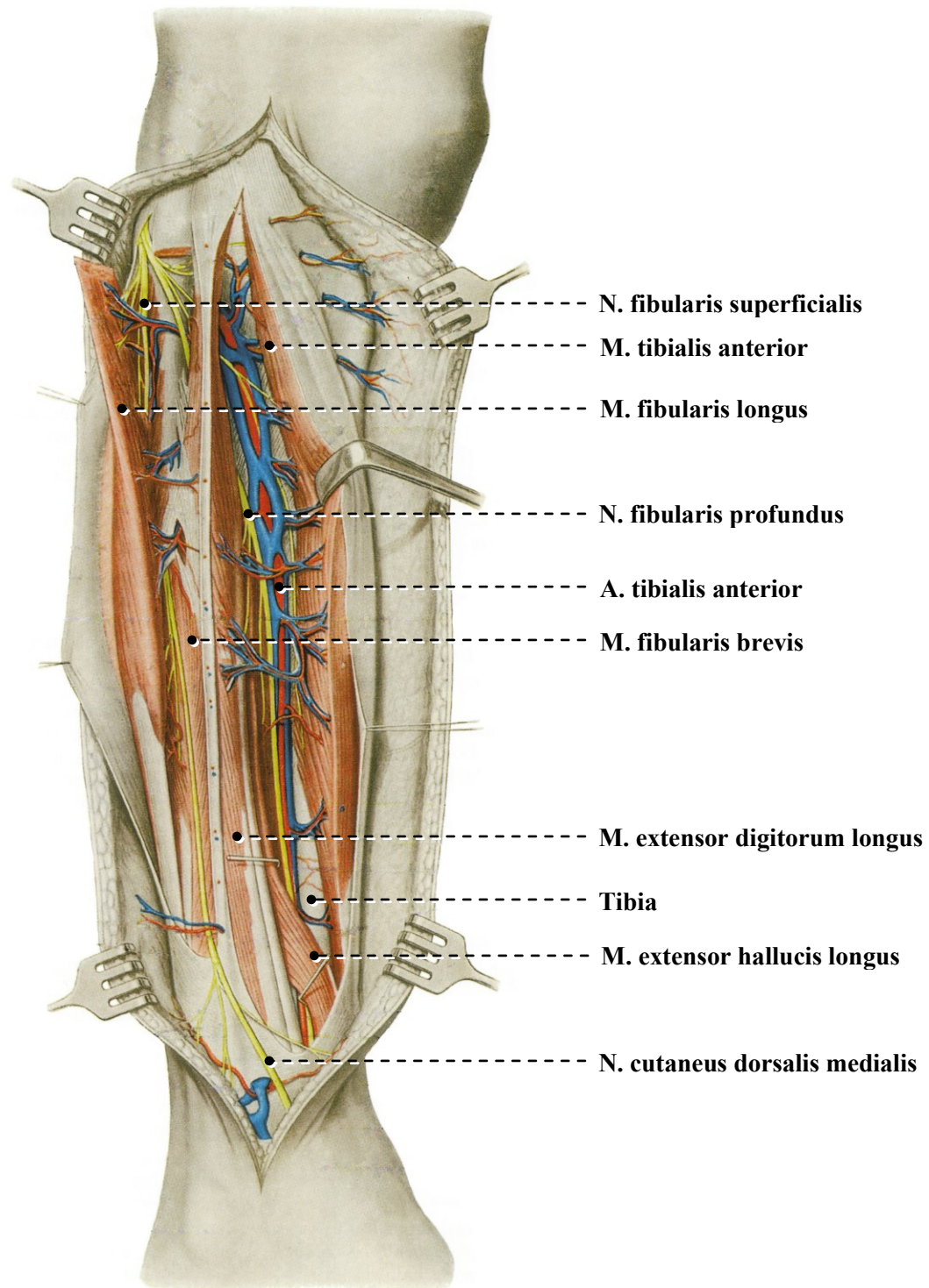


Abb. 1: Regio cruris mit Darstellung der Extensoren- und Fibularisloge

2.1.2. Die Sprunggelenke – topographische Betrachtungen

2.1.2.1. Das obere Sprunggelenk

Das obere Sprunggelenk ist funktionell ein Scharniergelenk, welches durch die Malleolen, die tibiofibuläre Syndesmose sowie mediale und laterale Seitenbänder geführt und gehalten wird. Eine Bewegung ist deshalb nur als Dorsal- und Plantarflexion um die quer verlaufende Achse durch beide Malleolen möglich (Debrunner 1994). Auf diese quere Flexionsachse wirken die Muskeln des Unterschenkels entsprechend der Lage ihrer Sehnen ein. In der Außenknöchelregion finden wir die an der Rückfläche des Malleolus lateralis verlaufenden Mm. fibularis longus et brevis. Beide werden zusätzlich durch das Retinaculum mm. fibularium superius et inferius am Calcaneus fixiert. Der N. suralis teilt sich am Außenknöchel auf und verläuft unter anderem als N. cutaneus dorsalis lateralis am lateralen Fußrand entlang. Dorsal des Malleolus medialis befindet sich der mit der tiefen Flexorenloge kommunizierende Tarsaltunnel, der in seiner profunden Etage die Beugersehnen und in seiner superficialen Etage die Inhaltsgebilde der hinteren Schienbeinstrasse zur Planta pedis führt. In der Mitte des Abstandes zwischen Innenknöchel und Achillessehne verläuft direkt unter der Haut und dem Pars superficialis des Retinaculum musculorum flexorum der Gefäßnervenstrang mit dem bereits in die den N. plantaris lateralis et medialis geteilten N. tibialis sowie den Vasa tibialia posteriora. Unter der Pars profunda des Retinaculum musculorum flexorum verlaufen die langen Beugersehnen zur Fußsohle. Dem Innenknöchel liegt dorsal der M. tibialis posterior direkt an, gefolgt von der Sehne des M. flexor digitorum longus und schließlich der des M. flexor hallucis longus. Innerhalb der profunden Etage des Tarsaltunnels verläuft jede Sehne umhüllt von einer eigenen Sehnenscheide in einem eigenen osteofibrösen Kanal, der durch straffe Septen zwischen Pars profunda des Retinaculum musculorum flexorum und Calcaneus gebildet wird.

Subkutan bildet sich das Quellnetz der V. saphena magna am Innenknöchel, über diesem und ventral verlaufend befinden sich die sensiblen Endäste des N. saphenus und die bereits am distalen Unterschenkel abzweigenden Rr. calcanei mediales des N. tibialis (Waldeyer und Mayet 1993).

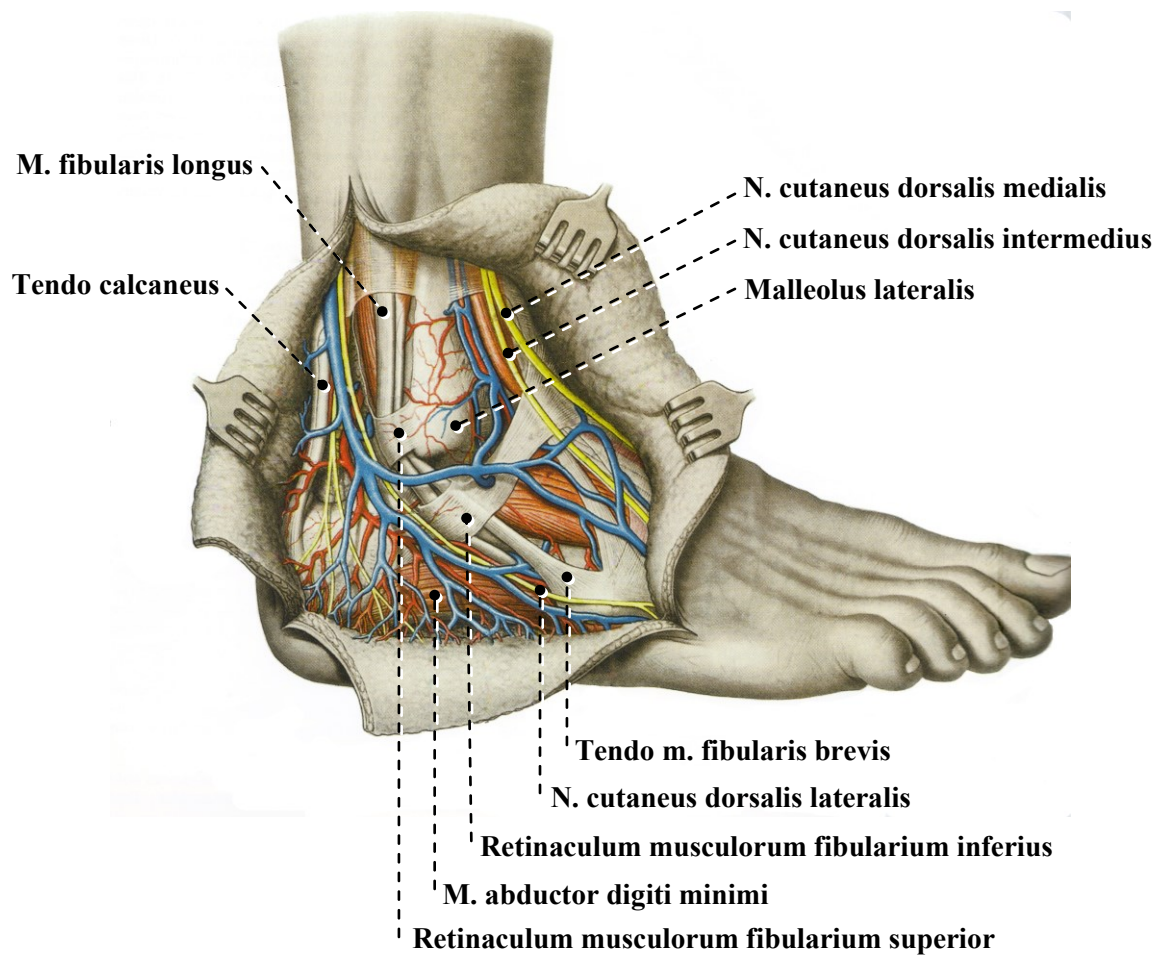


Abb. 2: Regio malleolaris lateralis

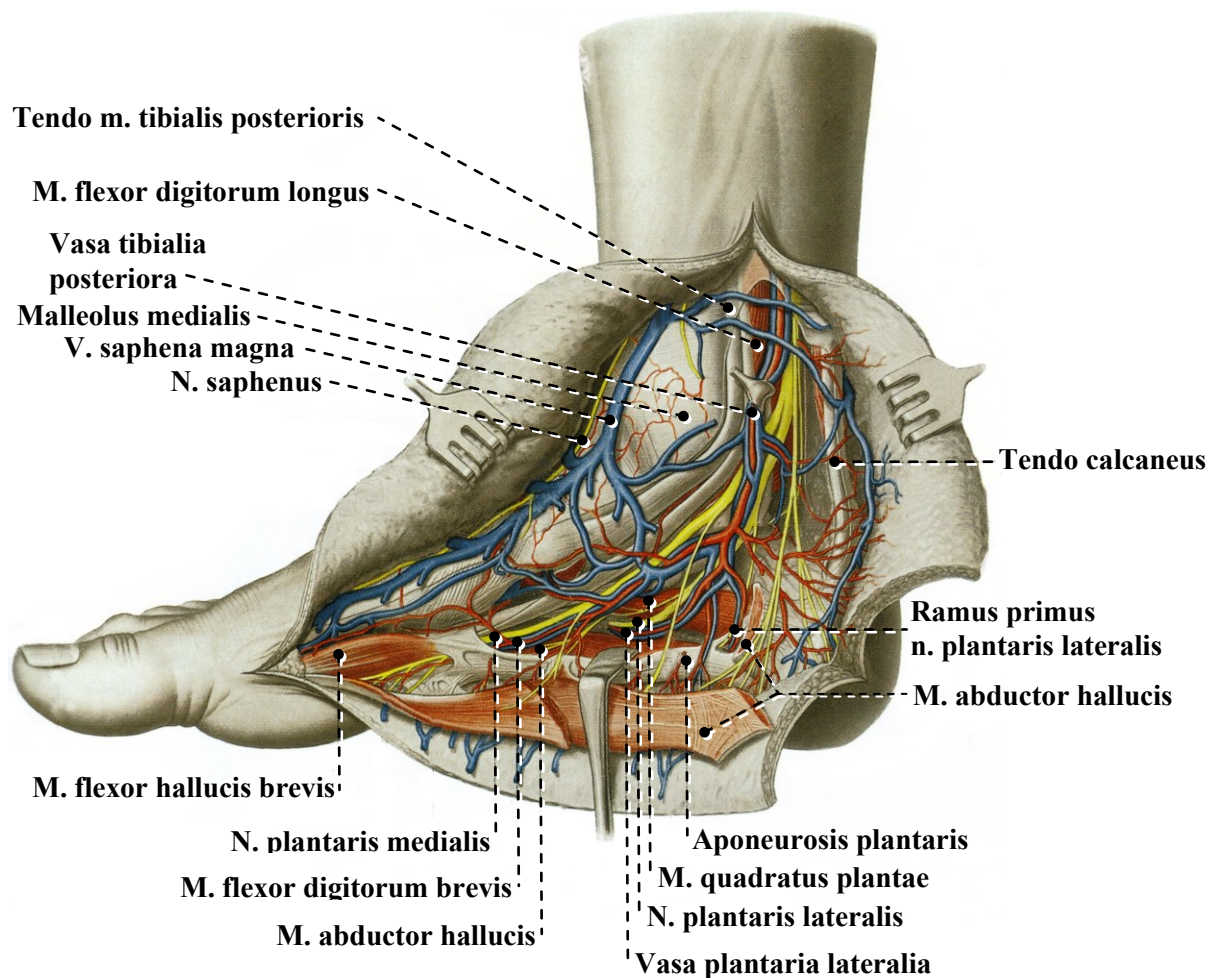


Abb. 3: Regio malleolaris medialis

2.1.2.2. Das untere Sprunggelenk

Das untere Sprunggelenk besteht aus zwei getrennten Gelenken, welche funktionell eine Einheit bilden. In der hinteren Articulatio subtalaris artikulieren die konvexe Facies articularis talaris posterior des Calcaneus mit der konkaven Facies articularis calcanea posterior des Corpus tali. Die vordere Articulatio talocalcaneonavicularis wird durch die 3 Gelenkflächen des Caput tali - die Facies articularis calcanea media et anterior sowie die Facies articularis navicularis, die 2 Gelenkflächen des Calcaneus - Facies articularis talaris media et anterior und Gelenkfläche des Os naviculare - Facies articularis talaris sowie durch das so genannte Pfannenband - das Lig. calcaneonavicularare plantare - gebildet. Die Gelenkkapsel beider Teilgelenke wird durch zahlreiche kräftige Bänder verstärkt, welche zum Teil eine große Bedeutung für die

Gewölbekonstruktion des Fußes haben (Waldeyer und Mayet 1993). Die Bewegung im unteren Sprunggelenk besteht aus einer Kombination in drei Ebenen, in denen die Achse von dorsolateral und kaudal nach ventromedial und kranial verläuft. Die Eversion des Vorfußes ist als Kombination von Pronation mit Abduktion und Dorsalextension und die Inversion als Kombination von Supination mit Adduktion und Plantarflexion zu verstehen (Debrunner 1994).

2.1.3. Regio calcanea – topographische Betrachtungen

Die Fersengegend ist durch die Achillessehne und das Tuber calcanei geprägt. Die Achillessehne wölbt sich nach dorsal vor und ist gut durch die Haut tastbar. Sie setzt am stark vorspringenden Tuber calcanei an und hebt sich dadurch deutlich von den tiefen Flexoren ab. Die Sehne des meist vorhandenen M. plantaris setzt ebenfalls am Tuber calcanei mit enger Verbindung zur ventralen Seite der Achillessehne und zu den dorsalen Kapselanteilen der Articulatio subtalaris. Die Blutversorgung der Achillessehne kommt hauptsächlich von oben aus dem Bereich des Muskel-Sehnenübergangs und von unten aus dem Ansatzbereich am Fersenbein. Sie erfolgt aus den Stromgebieten der A. fibularis und der A. tibialis posterior (Paar et al. 2001). Die sensible Innervation erfolgt über Rr. calcanei laterales des N. tibialis und des N. suralis (Waldeyer und Mayet 1993).

2.1.4. Planta pedis – topographische Betrachtungen

Die Fußsohle trägt die gesamte Körperlast und nimmt daher wichtige statische und dynamische Funktionen wahr. In Gebieten der stärksten Belastung neigt die Haut zu Schwielenbildung. Durch 3 knöcherne Abstützpunkte, an der Ferse, dem Groß- und dem Kleinzehenballen, entsteht eine Gewölbekonstruktion, in deren Kuppel der Talus liegt, der als Lastverteiler fungiert und diese funktionsabhängig auf den Rück- bzw. Vorfuß überträgt. Das Längsgewölbe wird durch kräftige plantare Längsbänder, vor allem durch das Lig. calcaneonaviculare plantare, das Lig. plantare longum und die Plantaraponeurose, sowie durch die kurze Fußsohlenmuskulatur und die langen Beugersehnen gesichert. Störungen dieser passiven und aktiven Stabilisatoren der Gewölbekonstruktion führen zu Fußdeformitäten. Die kurze Fußsohlenmuskulatur befindet sich in 3 verschiedenen Kompartimenten der Fußsohle; der medialen Großzehen-, der lateralen Kleinzehen- und der intermediären Mittelloge. Die Muskeln

des Großzehenballens beugen, abduzieren und adduzieren die Großzehe. Zu ihnen gehört der M. abductor hallucis, der M. flexor hallucis brevis und der M. adductor hallucis. Die Muskeln des Kleinzehenballens beugen, abduzieren und adduzieren die Kleinzehe, welches beim Menschen jedoch fast nur theoretischer Natur ist. Zu den Kleinzehenballenmuskeln gehören der M. abductor digiti minimi, der M. flexor digiti minimi brevis und der M. opponens digiti minimi. Die mittleren Fußsohlenmuskeln verlaufen mit den Sehnen der langen Zehenbeuger in einer gemeinsamen Faszienloge. Hierzu gehören der M. flexor digitorum brevis, der M. quadratus plantae, die Mm. lumbricales und die Mm. interossei. Der M. flexor digitorum brevis beugt die Mittelphalangen der 2.–5. Zehe. Der M. quadratus plantae und die Mm. lumbricales entspringen an den Sehnen des M. flexor digitorum longus und helfen die Zehen plantar zu beugen. Die Mm. interossei werden in 4 dorsale und 3 plantare Muskeln unterteilt, wobei die dorsalen die Zehen spreizen und die plantaren die Zehen zur 2. Zehe hin verlagern. Gemeinsam beugen die Mm. interossei in den Grundgelenken und strecken in den Interphalangealgelenken. Bei den Leitungsbahnen der Fußsohle handelt es sich um plantaren Endäste der A. tibialis posterior und des N. tibialis. Diese gelangen aus dem Tarsaltunnel unter dem M. abductor hallucis in die Schicht zwischen M. flexor digitorum brevis und M. flexor digitorum longus bzw. den an seinem lateralen Sehnenrand ansetzenden M. quadratus plantae. Im lateralen Gefäßnervenstrang verlaufen die Vasa plantaris lateralis und der N. plantaris lateralis in Richtung Kleinzehe. Die A. plantaris lateralis setzt sich auf den in der Tiefe liegenden Mm. interossei in den Arcus plantaris ab. Dieser entlässt die Aa. metatarsae plantares und anastomosiert über den ersten Intermetatarsalraum mit der A. dorsalis pedis (Waldeyer und Mayet 1993). Der N. plantaris lateralis entlässt in enger Lagebeziehung zum Calcaneus Rr. musculares für die am Tuber calcanei entspringenden Muskeln. Hier ist für unsere anatomische Betrachtung vor allem der Ramus primus n. plantaris lateralis von Interesse. Dieser Ast verläuft bedeckt vom M. abductor hallucis nach plantar am medialen Rand des M. quadratus plantae weiter nach lateral und distal zum M. abductor digiti minimi. Der Nerv innerviert darüber hinaus sensibel das Periost des Calcaneus und die Plantaraponeurose (McGarvey 2006, Fuhrmann und Fröber 2010)

Der N. plantaris lateralis teilt sich in einen R. superficialis und R. profundus auf. Der R. superficialis versorgt die Haut des lateralen Drittels der Fußsohle, der 5. Zehe und der lateralen Hälfte der 4. Zehe. Der R. profundus innerviert mehrere Muskeln der Fußsohle, wie die Mm. interossei, die beiden lateralen Mm. lumbricales, den M. flexor digiti minimi brevis, den M. opponens digiti minimi, den M. adductor hallucis und den lateralen Kopf des M. flexor hallucis

brevis. Der mediale Gefäßnervenstrang wird von den Vasa plantaris medialis und dem N. plantaris medialis gebildet. Die Arterie versorgt die mediale Fußseite, die Großzehe, die mediale Seite der 2. Zehe und anastomosiert in der Tiefe mit dem Arcus plantaris der A. plantaris lateralis. Der N. plantaris medialis innerviert über die Nn. digitales plantares die 1. bis 3. und die mediale Fläche der 4. Zehe sensibel. Weiterhin innervieren seine Muskeläste den medialen Kopf des M. flexor hallucis brevis, den M. adductor hallucis, den M. flexor digitorum brevis und die beiden medialen Mm. lumbricales (Waldeyer und Mayet 1993).

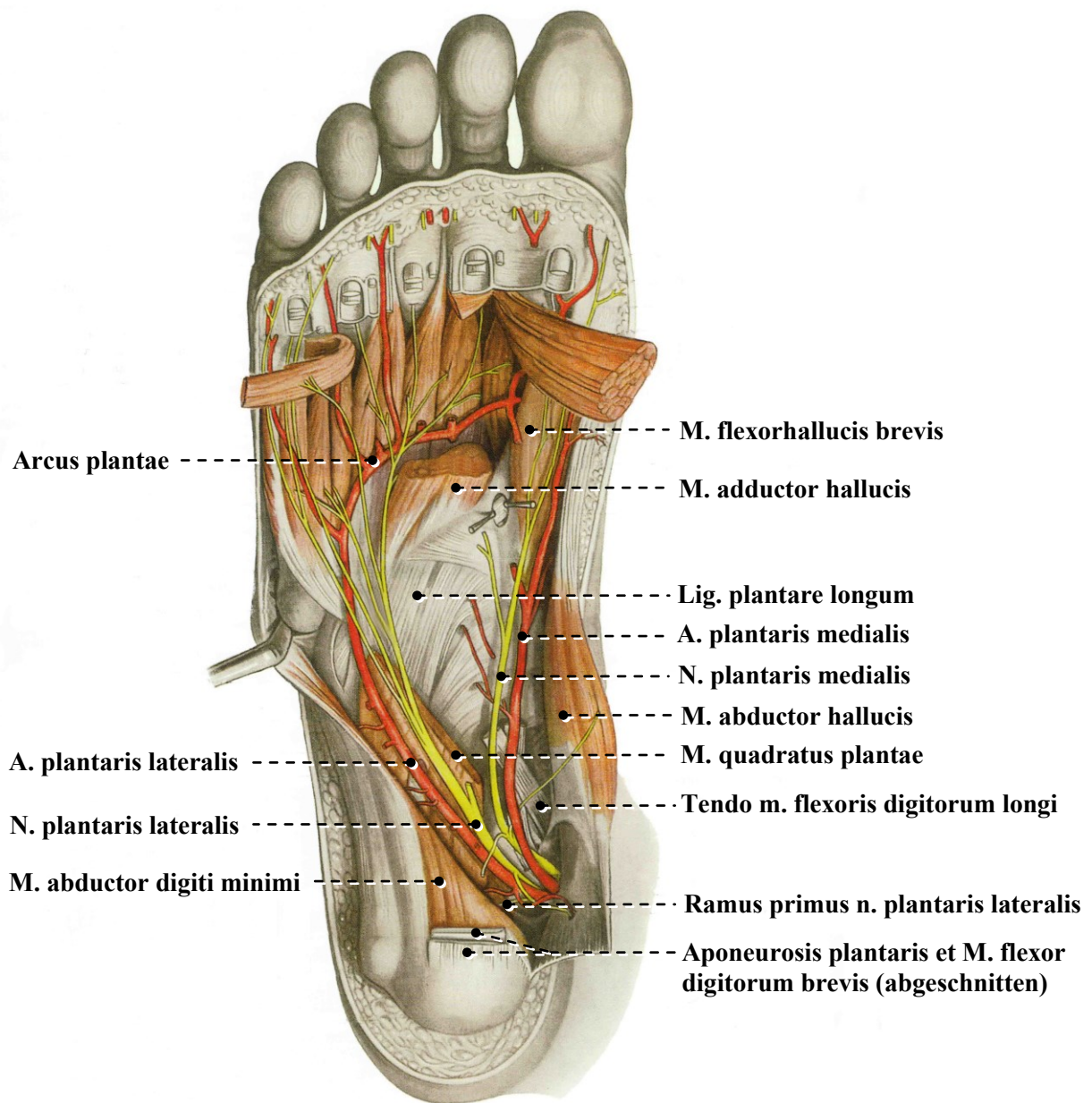


Abb. 4: Planta pedis

2.2. Grundlagen der Sprunggelenk-Arthrodesen

2.2.1. Historischer Überblick der Sprunggelenk-Arthrodesen

Als Arthrodesen bezeichnet man eine Versteifungsoperation eines Gelenkes. Der Begriff ist ein aus dem griechischen abgeleitetes Kunstwort aus „Gelenk“ und „Verbindung“. Der Innsbrucker Chirurg Eduard Albert berichtete 1877 in Wien erstmals über „Eine Kniegelenksresektion mit vollständiger Naht und primärer Vereinigung“ nachdem er eine Operation an einem Patienten mit Kontraktur des Kniegelenkes nach Infektion vorgenommen und hier die Therapie der Versteifungsoperation erstmalig durchgeführt hatte. Er führte auch die erste gezielte Arthrodesen eines Sprunggelenkes durch, als er bei einem 14-jährigen Mädchen beide Knie- und Sprunggelenke versteifte und ihr den aufrechten Gang ermöglichte, weil es wegen einer poliomyelitischen Lähmung nur auf den Knien rutschen konnte (Albert 1879).

Die ersten Anfrischungsarthrodesen der Sprunggelenke gaben v. Lesser 1879, Nicoladoni 1881 und v. Rydiger 1883 an. Cramer war der erste, welcher 1910 die Arthrodesen eines oberen Sprunggelenkes durch Stabilisierung und Schienung durch einen Knochenspan durchführte (Cramer 1910). Bei zunehmender Zahl der möglichen Arthrodesetechniken an den einzelnen Gelenken wurden diese erstmals 1917 durch A. Bier in seinem Buch „Chirurgische Operationslehre“ systematisch zusammengefasst (Bier 1917).

Man erkannte die Bedeutung der Fixation der Resektionsflächen zur Vermeidung von Komplikationen wie Infektionen und der Ausbildung von Pseudarthrosen bei unzureichender Kompression. Als mögliches Therapiekonzept wurde die Arthrodesen erst 1928 bei Arthrosen und ihren Folgen erkannt und angewandt (Thomann 1994).

Durch Greifensteiner wurde 1947 erstmals die Kompressionsarthrodesen mittels Spannbügel beschrieben und durch Charnley 1951 mittels Fixateur externe erreicht. Dieses Verfahren wies anfänglich große Schwächen auf und hatte eine hohe Rate an Infektionen, wie zum Beispiel Pininfektionen (Charnley 1951, Greifensteiner 1953). Charnley gilt heute als der Begründer der modernen Arthrodesen, da er als erster die Kompression mittels zweier in den Knochen eingebrachter Drähte, proximal und distal der Arthrodesefläche, propagierte und somit eine ausreichende Kompression auf die Knochenfläche erzeugte.

Um Komplikationen zu vermeiden und mehr Stabilität zu erreichen kam es in den 1960er Jahren zu der Tendenz interne Fixationsverfahren zur Kompression zu verwenden (Thomann 1994).

Die Verwendung von Spongiosaschrauben zur Arthrodesen wurde erstmals 1964 von Allgöwer und Huggler beschrieben (Allgöwer und Huggler 1964).

Durch Mittelmeier wurden erstmalig 1973 Kompressionswinkelplatten verwendet und Zimmermann stellte im selben Jahr das Prinzip der Osteosynthese mittels Zugschrauben vor (Zimmermann 1973, Mittelmeier et al. 1975). Diese Technik zeigte eine große Beliebtheit in der Anwendung zur Arthrodesen am Sprunggelenk (Thomann 1994). Bekannt ist vor allem die Zugschraubenarthrodesen nach Wagner, welche er 1982 vorstellte und welche durch Gschwend und Steiger nochmals modifiziert wurde (Wagner und Pock 1982, Gschwend und Steiger 1987).

Die arthroskopisch assistierte Arthrodesen des oberen Sprunggelenkes wurde erstmalig von Schneider 1983 erwähnt (Schneider 1983). Sie stellt eine interessante Alternative zur konventionellen Arthrodesen des Sprunggelenkes dar, da sie sehr weichteilschonend und gerade bei Patienten mit einem hohen Risiko für postoperative Wundrand- und Weichteilnekrosen empfehlenswert ist (Jerosch und Heisel 2009).

Es kristallisierten sich im Laufe der Zeit zwei Haupttechniken der Arthrodesen heraus: die Arthrodesen mit Verriegelungsspan vor allem bei knöchernen Defekten und die Kompressionsarthrodesen in Kombination mit verschiedenen Implantaten und Transplantaten (Stahl und Maaz 1990, Bauer und Kinzl 1996).

In den 1990er Jahren kam als weitere Technik die Kompressionsarthrodesen mittels eines tibiotalaren Verriegelungsnagels mit Verriegelungsbolzen hinzu (Kile et al. 1994). Bereits 1945 beschrieben Küntscher und Maatz die Arthrodesen des Kniegelenkes mit einem über den Trochanter major eingebrachten Marknagel (Küntscher und Maatz 1945). Aber auch schon die Arbeiten von Maatz seit den 1940er Jahren zeigten den Versuch, das Kompressionsprinzip in das Marknagelkonzept einzubeziehen, um eine verbesserte Stabilität des Nagel-Knochen-Verbundes zu erzielen (Maatz et al. 1983, Mückley und Bühren 2004). Die Entwicklung eines Kompressionsnagels geht auf die 1950er Jahre zurück, als Olerud und Kaessmann erste Versuche unternahmen, die Prinzipien der Kompressionsosteosynthese auf die Marknagelung zu übertragen. Die Anforderungen der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen sollten durch die Ausübung einer interfragmentären Kompression erreicht werden (Kaessmann 1966). Das Prinzip wurde in der Entwicklung des Kompressionsmarknagels fortgesetzt und durch Mittelmeier und Ritter durch den Einsatz eines Kompressionsmechanismus gelöst, der seine Krafteinleitung über Verriegelungsbolzen im kortikalen Bereich einleitet (Mittelmeier et al. 1990, Ritter 1991, Mückley und Bühren 2004).

In den Zeiten der modernen Endoprothetik hat, trotz der Einführung und Verbesserung der Sprunggelenkarthroplastik, die Arthrodeese des Sprunggelenkes ihre Bedeutung als Therapie der Wahl bei fortgeschrittenen degenerativen Veränderungen unterschiedlicher Genese bis heute bewahrt (Thomann 1994, Jerosch und Heisel 2009). Die Sprunggelenkarthroplastik ist belastet durch ihre spezifischen Komplikationen mit frühzeitiger aseptischer Auslockerung, Infektion sowie unzureichender Schmerzminderung. Sie eignet sich bis dato vor allem für Patienten mit rheumatoider Arthritis, da bei diesem Patientenkontingent die angrenzenden Gelenke ebenfalls häufig in Mitleidenschaft gezogen sind und sie von einer Arthrodeese nicht immer in vollem Umfang profitieren (Stahl und Maaz 1990, Bauer und Kinzl 1996, Jung 2004). Auch ist das Bedürfnis nach einer Sprunggelenkarthroplastik durch die guten klinisch-funktionellen Ergebnisse einer Arthrodeese des Sprunggelenkes in korrekter Stellung geringer als in der Hüft- oder Kniegelenksregion (Bauer und Kinzl 1996).

Somit ist die Arthrodeese des oberen und unteren Sprunggelenkes bei entsprechender Indikationsstellung heute noch als Therapie der Wahl anzusehen, auch wenn die Fülle an verschiedenen Verfahren und die beschriebene Rate an Pseudarthrosen von bis zu 60% und einer Infektionsrate von bis zu 25% auf die Komplexität der Verfahren hinweisen (Goebel et al. 2006).

2.2.2. Indikationen und Kontraindikationen zur tibiototalcalcanearen Arthrodeese

Die klassischen Indikationen zur tibiototalcalcanearen Fusion (TTCF) sind eine schmerzhafte primäre, entzündliche oder posttraumatische Arthrosis deformans (Wagner und Pock 1982). Weiterhin gehören die avaskuläre Talusnekrose, der rheumatoide oder diabetische osteoarthrotische Befall der Sprunggelenke wie auch Korrekturosteotomien bei Fehlstellungen des Rückfußes dazu. Auch das Versagen oder die Aussichtslosigkeit einer konservativen Therapie, Pseudarthrosen, signifikante Gelenkinstabilitäten, Subluxationen, Arthritis, neuromuskuläre Erkrankungen, Frakturen mit nicht rekonstruierbaren Gelenkflächendestruktionen oder schwere Läsionen nach Tumorentfernung gehören in das Indikationsfeld der TTCF (Bauer und Kinzl 1996, Jung 2004, Grass 2005, Jerosch und Heisel 2009).

Bei allen Indikationen ist die Individualität des Patienten zu beachten, wie Lebensalter, Gewicht, berufliche und sportliche Aktivität sowie der persönliche Anspruch des Patienten. Dabei steht die bestehende Beschwerdesymptomatik des Patienten mit Betonung auf einen (Ruhe-) Schmerz,

die Mobilität nur noch an Hilfsmitteln mit einer stark verkürzten Wegstrecke und eine daraus folgende Verminderung der Lebensqualität im Vordergrund (Jung 2004).

Als wesentliche Prinzipien bei allen Arthrodesen sollten die Kompression, die stabile Fixation und die Aneinanderlagerung gut durchbluteter Knochenflächen mit Wiederherstellung der Belastbarkeit der unteren Extremität angesehen werden (Jung 2004, Mückley und Hofmann 2005).

Die Arthrodesen sind und bleiben ein wichtiges Instrument und Rückzugsgebiet in der Hand des erfahrenen Operateurs.

Die Kontraindikationen einer Arthrodesen am Sprunggelenk sind in absolute und relative zu unterteilen. Als absolute Kontraindikationen gelten Beugekontrakturen in Hüfte oder Knie, welche eine normale Belastung des Beines auch nach erfolgreicher Sprunggelenkarthrodesen unmöglich machen. Die relativen Kontraindikationen, welche in das Feld der „komplizierten Arthrodesen“ fallen, sind in einer bereits bestehenden Schädigung der angrenzenden Gelenke, in einer Osteoporose, in neurogenen und vaskulären Begleiterkrankungen, wie der Polyneuropathie und der pAVK, oder bei septischen Patienten zu sehen (Jung 2004). Schwere und nicht redressierbare Fehlstellungen des Sprunggelenkes, des Rückfußes und der distalen Tibia können relative Kontraindikationen für eine geschlossene Fixation mittels retrogradem Marknagel darstellen (Jerosch und Heisel 2009).

2.2.3. Die retrograde Sprunggelenksarthrodesenagelung

Die retrograde Marknagelung bei der tibiototalcalcanearen Fusion (TTCF) ist ein etabliertes Osteosyntheseverfahren. In den Anfängen wurden häufig retrograde Femurnägel bzw. retrograde Sprunggelenksarthrodesenägel eingesetzt bei denen die Verriegelungsschrauben ausschließlich in der Frontalebene positioniert waren. Eine Weiterentwicklung mit verbesserten biomechanischen Daten stellte die II. Generation an Marknägeln zur TTCF dar, welche zur Optimierung der Verriegelungsmöglichkeiten eine Posteriore-Anteriore-Verriegelungsschraube im Fersenbein aufwies (Quill 1999). Mann et al. konnten eine signifikant höhere Rotationssteifigkeit der Marknagel mit PA-Schraube im Vergleich zum Nageldesign mit Verwendung einer konventionellen transversalen, calcanearen Schraube nachweisen (Mann et al. 2001). Von ebenso großer Bedeutung für die biomechanische Stabilität der TTCF mit Marknägeln ist die Kompression der Gelenkflächen (Mückley et al. 2006).

Die überwiegende Anzahl der eingesetzten Marknägel zur retrograden TTCT sind gerade Nägel. Bislang liegen nur wenige Publikationen über klinische Ergebnisse mit gebogenen Nägeln vor, wobei meist Femur- oder Humerusnägeln verwendet werden, welche offiziell nicht zur TTCT zugelassen sind und in den USA auch bei der Food and Drug Administration keine Zustimmung haben (Moore et al. 1995, Pochatko et al. 1995, Quill 1996, Hammett et al. 2005). So berichtete Quill zudem über Schwierigkeiten bei der Verwendung eines 8°-gebogenen supracondylären Femurnagels, weshalb er zu einem geraden Nageldesign wechselte (Quill 1999).

Das grundsätzliche Problem bei Verwendung gerader Marknägeln zur TTCT stellt die knöcherne Abstützung der Nägel im Fersenbein dar, da die korrekte Eröffnungsstelle mittig zwischen medialer Begrenzung des Sustentaculum tali und der lateralen Corticalis des Fersenbeinkörpers liegt und somit der mediale Aspekt der Nagelbasis regelhaft nicht von Knochen umgeben ist. Auch Verriegelungen von lateral in diesem Bereich sind kritisch, da sie nicht immer zuverlässig im Sustentaculum-Fragment platziert werden können und somit Weichteilstrukturen schädigen können. Die gefährdeten anatomischen Strukturen im plantaren Aspekt des Fußes im Rahmen der TTCT mit retrogradem Nagel wurden von Pochatko et al. analysiert (Pochatko et al. 1995). Pochatko et al. untersuchten jedoch einen retrograden Femurnagel, der nicht an die anatomischen Gegebenheiten im Rückfußbereich angepasst war. Eine Resektion des Innenknöchels mit Medialisierung von Talus und Calcaneus gegenüber dem Tibiaschaft verbessert die knöcherne Führung im Calcaneus und vergrößert den Abstand der Implantatteile zu den neurovaskulären Strukturen, benötigt jedoch zusätzliche Inzisionen und gefährdet die Blutversorgung des Talus über die Gefäße im Verlauf des Innenbandes (McGarvey et al. 1998). Zudem geht der Verlust des physiologischen seitlichen Versatzes des Calcaneus gegenüber der Tibia mit einer eventuellen geringen Varisierung der Rückfußachse einher und bedarf in der Regel der klassischen Gelenkflächenresektion mit resultierender Beinverkürzung. Die aufgeführten Gründe sprechen gegen eine routinemäßige Medialisierung von Calcaneus und Talus. Mittlerweile liegt ein weiterentwickelter Marknagel zur TTCT vor, welcher mit einer 5°-Valgusbiegung im Rückfußbereich zur Verbesserung der knöchernen Führung im Fersenbein versehen wurde und an die anatomischen Gegebenheiten angepasste Verriegelungsoptionen aufweist (Mückley et al. 2006).

3. Ziele der Arbeit

Im Rahmen der Arthrodesen am unteren und oberen Sprunggelenk gibt es in der Literatur diverse Verfahren, unter anderem die Verwendung eines retrograden Nagels. Diese retrograde Marknagelung ist heutzutage ein etabliertes Verfahren für die tibiototalcalcaneare Fusion (TTCF). Inhalt dieser anatomischen und radiologischen Untersuchung ist der Vergleich zwischen einem geraden und einem anatomisch valgisch gekrümmten retrograden Arthrodesenagel. Es soll geklärt werden, ob sich diese Veränderungen im Nageldesign auf die Gefährdung anatomischer Strukturen und die knöcherne Einbettung der Nagelbasis im Fersenbein auswirken.

Im Unterschied zu den Untersuchungen von McGarvey et al. und Pochatko et al. erfolgte die Applikation der intramedullären Nägel unter realen Operationsbedingungen mit Festlegung des korrekten Eröffnungspunktes von retrograd unter Bildverstärkerkontrolle und kompletter Verriegelung (Pochatko et al. 1995, McGarvey et al. 1998).

Zusätzlich sollen erstmals auch die gefährdeten Strukturen im Bereich der Verriegelung an der Nagelspitze untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen eventuelle Unterschiede beider Nägel darstellen und bei der chirurgischen Anwendung klinisch relevante Komplikationen verringern.

4. Methodik

4.1. Untersuchungsgut

Die vorgestellte Studie erfolgte an 6 Paaren unfixierter unterer Extremitäten. In allen Fällen handelt es sich um Leichenteile von Körperspendern des Institutes für Anatomie I des Universitätsklinikums Jena. Die Körperspender hatten zu Lebzeiten schriftlich verfügt, dass ihr Leichnam für medizinische Lehre und Forschung zur Verfügung steht. Bei den Leichnamen handelte es sich um 2 Frauen und 4 Männer zwischen 54 und 78 Jahren; das durchschnittliche Alter lag bei 65 ½ Jahren. Die Auswahl der unterschiedlichen Altersstufen erfolgte vor dem Hintergrund, dem Patientenkollektiv der tibiototalcanearen Arthrodeese gerecht zu werden.

Die in die Studie einbezogenen Präparate wurden auf Höhe der Tuberositas tibiae mit Hilfe einer Hand- bzw. Bandsäge amputiert. Danach wurden sie mehrfach verpackt und tief gefroren, um den Hygienestandards gerecht zu werden. Ein bis zwei Tage vor Einbringen des jeweiligen Nagels wurden die Präparate aufgetaut, um Gefrierartefakte während der Operation zu vermeiden.

4.2. Bildgebung

Vom Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie II des Universitätsklinikums Jena wurden vor und nach der bildwandlergestützten Instrumentierung unter OP-Bedingungen eine hochauflösende Computertomographie (CT) an einem 16-Zeiler Multidetektor-CT (GE-lightspeed 16) mit einer AW4.2-Rekonstruktionskonsole an den noch gefrorenen Leichenbeinpaaren durchgeführt. Zur Untersuchung wurden die Beinamputate in Seitlagerung in 1.25/5.62mm axialer Schnittführung untersucht und sekundär 1.25mm Schichten mit 1mm Bildinkrement im Knochen- und Weichteilalgorithmus erzeugt. Aus den infolge der besseren Auflösung der z-Achse nahezu isotropen Voxeln konnten infolge einer Überlappung der Bildschichten stufenfreie, multiplanare 2D-Reformatierungen sowie frei im Raum drehbare 3D-Rekonstruktionen erzeugt werden. Für diese wurde ein eigener, halbtransparenter Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt, der eine exakte Beurteilung der Lage des Implantates in Bezug auf die ossären Strukturen in den Raumachsen erlaubte. Die Winkelmessungen wurden

goniometrisch an den 3D-Rekonstruktionen ausgeführt. Zur Beurteilung der ossären Führung im Calcaneus wurde eine Volumetrie des Nagels im Calcaneus mit einer Präzision von $\pm 0,1\text{ml}$ durchgeführt. Zusätzlich wurden die Achsverhältnisse des Rückfußes in der Frontalebene analysiert und pathologische Veränderungen des Talus, Calcaneus und der Tibia ausgeschlossen.

4.3. Operatives Vorgehen

Im Paarvergleich wurden zwei unterschiedliche retrograde Nägel zu

-Nageltyp 1: ein gerader Nagel mit Verriegelungsschrauben von lateral nach medial auf Tibia-, Talus- und Calcaneushöhe, zusätzlich im Fersenbeinbereich von posterior nach anterior (Firma Biomet: 180mm Länge/11mm Durchmesser), (Abb. 5).

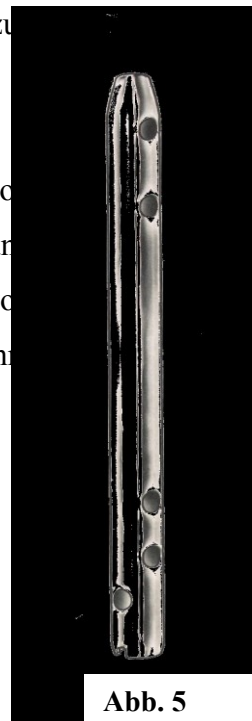


Abb. 5

-Nageltyp 2: ein Nagel mit 5° Valgusbiegung im Rückfußbereich mit Verriegelungsschrauben von lateral nach medial im Calcaneus- und Talusbereich, von medial nach lateral im distalen Unterschenkelbereich und zusätzlich von posterior nach anterior im Calcaneus (Fa. Stryker 200mm Länge/11mm Durchmesser), (Abb. 6).



Abb. 6

4.3.1. Operationsanleitung Nageltyp 1

Als Standardzugang wurde ein lateraler Hautschnitt über dem Außenknöchel angelegt und die distale Fibula auf Höhe des oberen Sprunggelenkspaltes freipräpariert (Abb. 7).

Der nächste Schritt beinhaltet die Resektion der distalen Fibula. Ein Schrägschnitt mit einer oszillierenden Säge erfolgt etwa 2cm proximal der tibiotalaren Gelenklinie. Damit wurden circa 5cm der distalen Fibula reseziert (Abb. 8).

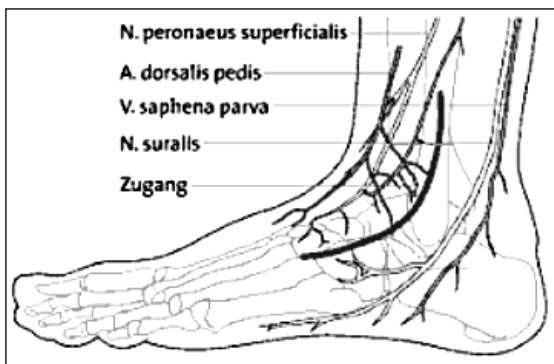


Abb. 7

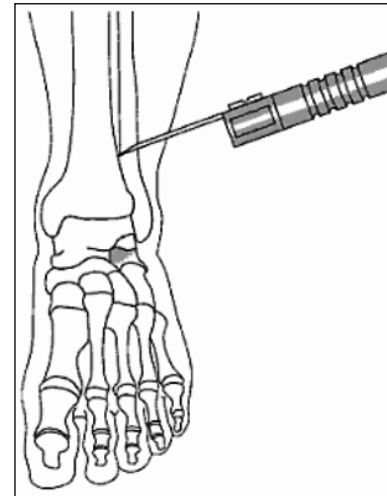


Abb. 8

Die Gelenkflächen wurden in Anlehnung an die Arbeit vom Pochatko et al. nicht präpariert und die Arthrodese manuell unter Bildverstärkerkontrolle in physiologischer Valgusstellung, neutraler Dorsiflexion, 10° Aussenrotation und mit dem Talus unter dem tibialen Plafond zentriert als in-situ Arthrodese eingestellt. Es erfolgte ein 3cm langer plantarer Hautschnitt über der Kreuzung der sagittalen Linie, von der Spitze der zweiten Zehe zur Mitte der Ferse, und der coronalen Linie, an der Verbindung des vorderen und mittleren Drittels des Fersenpolsters. Dies wurde übereinstimmend zur Beschreibung von Stephenson et al. für die Eröffnungsstelle zur retrograden Marknagelung durchgeführt (Stephenson et al. 1996), (Abb. 9).

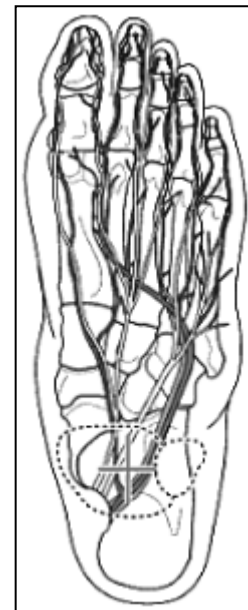


Abb. 9

Anschließend erfolgte die stumpfe Präparation durch die Aponeurosis plantaris, den M. flexor digitorum brevis und den M. quadratus plantae bis auf die plantare Kortikalis des Calcaneus. Nach Einsetzen von Haken zum Schutz der Weichteile wurde für den Nageltyp 1 unter Bildwandlerkontrolle in beiden Ebenen ein 3mm Kirschnerdraht (KD) vom plantaren Hautschnitt ausgehend durch den Calcaneus und den Talus mittig in den distalen Tibiaschaft gebohrt. Mit einem 7mm kanülierten Bohrer wurde über den Kirschnerdraht durch die subtalaren und tibiotalaren Gelenkflächen gebohrt (Abb. 10). Nach dem Aufbohren wurde der KD entfernt und durch einen Ø3x800mm Führungsdraht mit Olivenspitze ersetzt.

Der Markkanal wurde nun in 0,5mm Schritten stufenweise mit flexiblen Bohrwellen bis auf 12,5mm aufgebohrt (Abb. 11). Es wurde darauf geachtet, dass die Bohrtiefe im Tibiaschaft nicht mehr als 18-20cm betrug. Nach abgeschlossener Markraumaufbohrung wurde der Führungsdraht entfernt und durch einen Führungsdraht ohne Olivenspitze ersetzt.

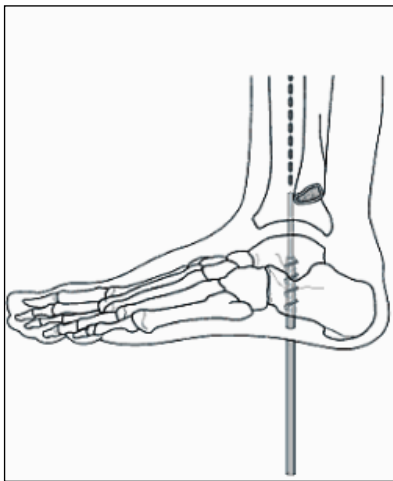


Abb. 10

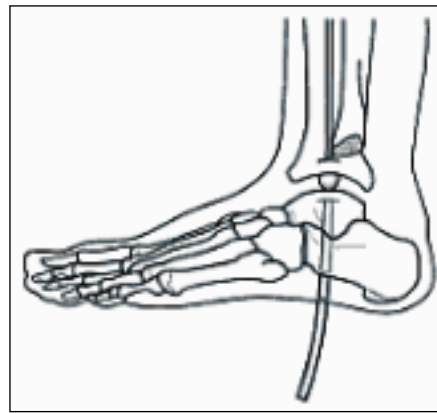


Abb. 11

Es wurde beim Aufbohrvorgang darauf geachtet, dass die Kortikalis der Tibia weitestgehend unverletzt blieb um eine optimale Stabilität zu gewährleisten. Dann wurde an dem Nagel das Kompressionsinstrumentarium samt Zielbügel montiert und der Nagel über den Führungsdraht in den Fuß eingebracht (Abb. 12).

Der Nagel wurde so rotiert, dass er mit dem Zielarm auf der lateralen Seite zu liegen kam und die Verriegelungsschrauben von lateral nach medial in die Tibia gesetzt werden konnten ohne die Fibula zu tangieren. Begonnen wurde mit den beiden proximalen Verriegelungsschrauben. In die Führungsrohre des Zielbügels wurden die Bohrhülsen eingebracht und unter Bildwandlerkontrolle an der Eintrittsstelle ein kleiner Hautschnitt gesetzt. Über diesem wurde die Bohrhülse nach Spreizen der subkutanen Weichgewebsstrukturen auf die laterale tibiale Kortikalis gesetzt und mit einem 4,3mm Bohrer die laterale und mediale Kortikalis durchbohrt (Abb. 13). Die Schraubenlänge wurde mit einem Tiefenmessinstrument bestimmt und anschließend die passende bikortikale Schraube eingesetzt.

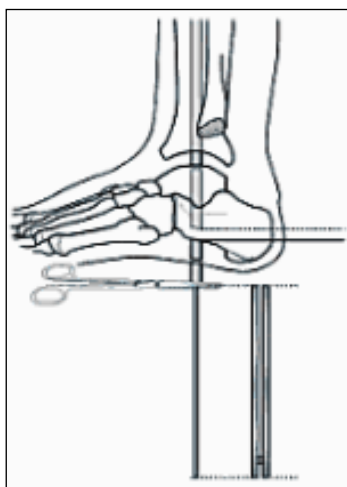


Abb. 12

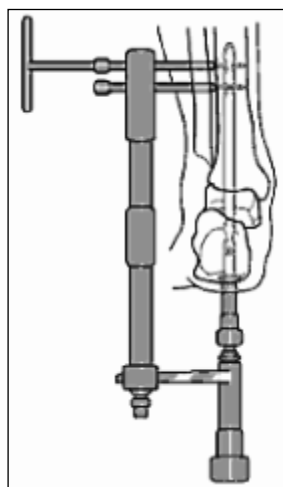


Abb. 13

Nach dem Einsetzen der proximalen Schrauben wurde eine Kompression der Sprunggelenks- und subtalaren Arthrodese durchgeführt. Die Kompressionshülse wurde, unter Schutz der Weichteile, dabei bis auf den Kalkaneus mit einem Maulschlüssel vorgeschraubt, wobei die Anlagerung der Gelenkflächen im oberen Sprunggelenk entscheidend war (Abb. 14). Es wurde darauf geachtet, dass die Kompressionshülse nicht die plantare Kortikalis des Kalkaneus schädigte.

Nach der gewünschten Kompression wurde mit der distalen Verriegelung begonnen, um das Kompressionsergebnis zu sichern. Die distalen Verriegelungsschrauben wurden ebenfalls von lateral nach medial in Talus und Kalkaneus eingesetzt. Dies musste unter Schutz der fibularen Weichteilstrukturen geschehen.

Beim Einsetzen der posteroanterioren Schraube wurde der Zielbügel um 90° gedreht und die Schraube, nach Setzen eines kleinen Hautschnittes, über die Bohrhülse eingebracht (Abb. 15). Der Schraubenkopf wurde vollständig im Kalkaneus versenkt.

Die von Biomet angegebene Versenkung des Nagels um 5-10mm zur plantaren kalkanealen Kortikalis wurde in Hinsicht des bündigen Oberflächenabschlusses der Kortikalis mit der Verschlusskappe umgesetzt.

Nach Entfernung des Zielinstrumentariums wurde eine abschließende Bildwandlerkontrolle durchgeführt um die korrekte Lage des Nagels zu dokumentieren. Nach Verpacken des Fußes in zwei Plastiktüten wurde dieser erneut tiefgefroren.

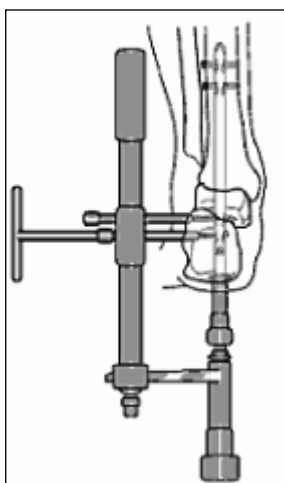


Abb. 14

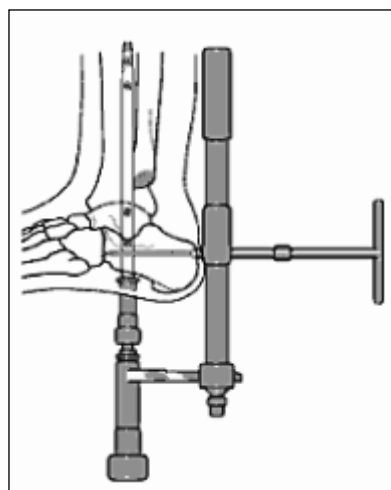


Abb. 15

4.3.2. Operationsanleitung Nageltyp 2

Da sich die Operationsverfahren der Marknägel der Firma Biomet und Stryker nur in wenigen, aber markanten, Punkten unterscheiden werden hier nur die Unterschiede zur vorangehenden Operationsanleitung beschrieben. Abweichend vom Nageltyp 1 gibt es den Nageltyp 2 jeweils für den linken und rechten Fuß. Gründe dafür sind seine Valgusbiegung von 5° und vor allem der 10° Winkel, in dem die posterior-anteriore Schraube von postero-medial nach antero-lateral verläuft (Abb. 16).

Nach Einsetzen von Haken zum Schutz der Weichteile wurde für den Nageltyp 1 unter Bildwandlerkontrolle ein 3mm Kirschnerdraht vom plantaren Hautschnitt ausgehend durch den Calcaneus und den Talus mittig in den distalen Tibiaschaft gebohrt. Abweichend von diesem Operationsschritt sollte für den Nageltyp 2 die retrograde Eröffnung der Valgusbiegung des Marknagels gerecht werden. Hierzu wurde zunächst ein 3mm KD in einem Valguswinkel von ca. 5° retrograd nur bis in den Gelenkspalt des Tibiotalgelenkes vorgebohrt (Abb. 17 und 18).



Abb. 16



Abb. 17 und 18

Bei korrekter Lage wurde dieser KD über diese Strecke mit einem kanülierten Bohrer überbohrt (Abb. 19).

Nachfolgend wurde der KD erneut über den gebohrten Knochenkanal in Calcaneus und Talus zentral retrograd weiter in den distalen Tibiaschaft eingebracht und dann der Markraum mit flexiblen Markraumwellen in Analogie zu Nageltyp 1 präpariert (Abb. 20 und 21).



Abb. 19

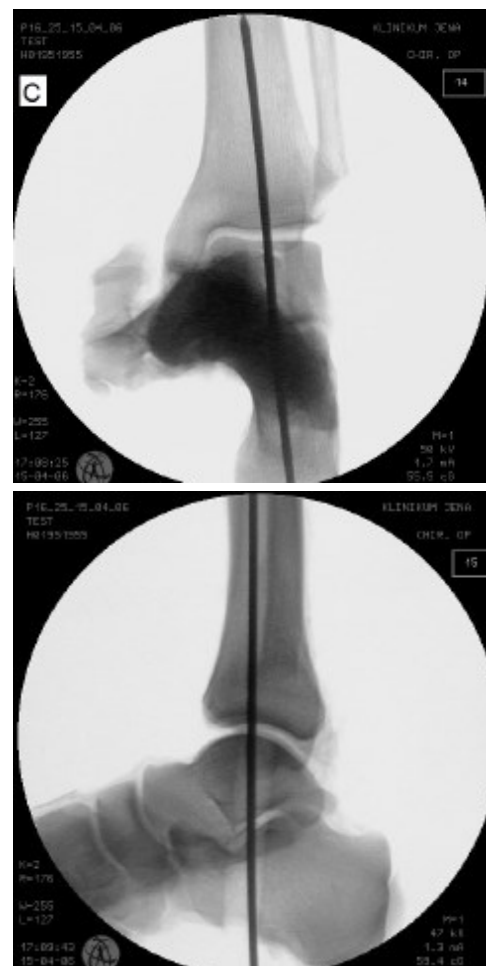


Abb. 20 und 21

Bei der Implantation des Marknagels wurde zur Überprüfung der richtigen Rotation des Nageltyps 2 mit Hilfe des kleinen Zielbügels und eines Kirschnerdrahtes der Eintrittspunkt der posterior–anterioren Schraube festgelegt. Kurzfristig wurde der KD bis 1cm tief in den Kalkaneus gebohrt um die Rotationsausrichtung zu sichern (Abb. 22). Bei der Implantation des Nageltyps 2 wurde zu Beginn im Talus von lateral nach medial verriegelt und dann der Zielbügel um 180° geschwenkt, um darauf die Verriegelung von medial nach lateral im distalen Tibiaschaftbereich mit zwei Schrauben durchzuführen (Abb. 23).



Abb. 22

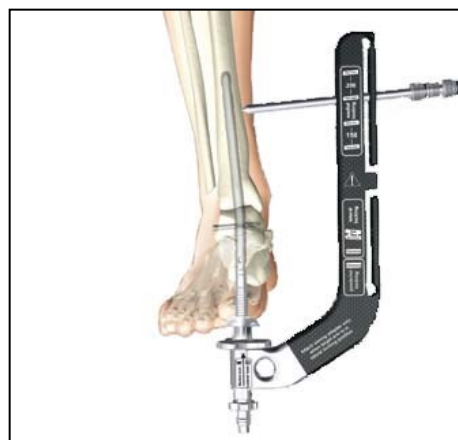


Abb. 23

Nach der Platzierung der zwei Verriegelungsschrauben im distalen Tibiabereich wurde mit der inneren Kompression begonnen. Dies wurde mit einer kanülierten Kompressionsschraube, welche im Nagelinneren nach proximal geschraubt wurde, umgesetzt (Abb. 24). Die externe Kompression wurde ebenfalls aufgebracht. Nach erfolgter Kompression der Gelenkflächen wurde der Zielbügel um 180° zurückgeschwenkt und im Kalkaneus von lateral nach medial bzw. nach einem weiteren Schwenkvorgang von 90° von posterior nach anterior verriegelt. Danach wurde der Zielbügel abmontiert und abschließend eine Bildwandlerkontrolle der Nagelposition zur Dokumentation des Operationsergebnisses durchgeführt.



Abb. 24

4.4. Anatomische Präparation

Die Anatomische Präparation wurde an Institut für Anatomie I des Universitätsklinikums Jena durchgeführt. Da es sich um Frischpräparate handelte, d.h. keine Formalin oder anderweitige Fixierung stattfand, erfolgte die Präparation in einem, den besonderen hygienischen Anforderungen entsprechenden Raum.

Nach Absetzen der Beinamputate wurden diese in Plastiktüten verpackt, mit der entsprechenden Nummer beschriftet und tief gefroren. Nach dem präoperativen CT, der Implantation des Nagels und dem postoperativen CT wurde diese aufgetaut und mit der Präparation begonnen. 1 bis 2 Tage vor der Präparation wurden die Amputate aus der Tiefkühlung genommen und bei Raumtemperatur langsam aufgetaut.

In 2 Vorversuchen wurden an formalinfixierten Amputaten erste Präparationen durchgeführt, um die anatomisch-klinisch relevanten Strukturen zu identifizieren. Bei diesen Strukturen handelte es sich um Blutgefäße, Nerven, Sehnen bzw. Sehnenplatten und Muskeln.

4.4.1. Relevante anatomische Strukturen

Folgende anatomische Strukturen wurden im Operationsgebiet der Nageleintrittsstelle identifiziert und als potentiell verletzungsgefährdet eingestuft:

Blutgefäße	Nerven	Muskeln	Sehnen	Sonstiges
A. plantaris medialis	N. plantaris medialis	M. flexor digitorum brevis	M. fibularis longus	Aponeurosis plantaris
A. plantaris lateralis	N. plantaris lateralis	M. quadratus plantae	M. flexor hallucis longus	Lig. plantare longum
	R. primus n. plantaris lateralis (Baxter)	M. abductor digiti minimi	M. flexor digitorum longus	
		M. abductor hallucis		

Folgende anatomische Strukturen wurden im Bereich der Talus- und Calcaneusschraube lateralseitig identifiziert und als potentiell verletzungsgefährdet eingestuft:

Blutgefäße	Nerven	Muskeln	Sehnen	Sonstiges
	N. cutaneus dorsalis lateralis		M. fibularis brevis	Retinaculum musculorum fibularium sup. et inf.
	N. cutaneus dorsalis intermedius		M. fibularis longus	

Folgende anatomische Strukturen wurden Bereich der Talus- und Calcaneusschraube mediallyseitig identifiziert und als potentiell verletzungsgefährdet eingestuft:

Blutgefäße	Nerven	Muskeln	Sehnen	Sonstiges
A. tibialis posterior	N. tibialis posterior		M. tibialis posterior	
A. plantaris medialis	N. plantaris medialis		M. flexor digitorum longus	
	N. plantaris lateralis		M. flexor hallucis longus	

Folgende anatomische Strukturen wurden Bereich der obere und untere Tibiaverriegelungsschraube identifiziert und als potentiell verletzungsgefährdet eingestuft:

Blutgefäße	Nerven	Muskeln	Sehnen	Sonstiges
A. tibialis anterior	N. saphenus	M. tibialis anterior		
V. saphena magna	N. fibularis profundus	M. extensor digitorum longus		
	N. fibularis superficialis	M. extensor hallucis longus		

Folgende anatomische Strukturen wurden Bereich der postero-anterioren Verriegelungsschraube im Calcaneus identifiziert und als potentiell verletzungsgefährdet eingestuft:

Blutgefäße	Nerven	Muskeln	Sehnen	Sonstiges
			Breite des Achillessehnenansatzes	Schraubenmitte von lateral

4.4.2. Präparationsablauf

Die Präparation der Amputate wurde in folgenden Schritten vollzogen: Es erfolgte zunächst eine zirkuläre Hautincision ca. 3-5cm unterhalb der Absetzung des Unterschenkels. Weiterführend folgt eine laterale und mediale Schnittführung bis auf Höhe der Malleoli und von dort nach lateral und medial bis zu den Articulationes metatarsophalangeae. Hier erfolgte wiederum ein zirkulärer Schnitt. Nach vorsichtigem Abtragen der Haut vom Unterhautfettgewebe unter Schonung cutaner Venen und Hautnerven wurde das Unterhautfettgewebe bis auf die Fascia cruris et dorsalis pedis von proximal nach distal abpräpariert. Dies erfolgte, um anatomische Strukturen wie Venen und Hautnerven in großer Kaliberstärke aufzusuchen und sie in ihrem Verlauf besser nach distal verfolgen zu können. An der Planta pedis wurde die Aponeurosis plantaris von distal her von den darunter liegenden Muskeln abgelöst. An ihrem Ursprung, dem Tuber calcanei, wurde sie belassen und konnte so nach proximal geklappt werden. Es konnten nun die unter 4.4.1. beschriebenen Muskeln, Bänder, Sehnen, Gefäße und Nerven der Planta pedis dargestellt werden. Auf Höhe des Malleolus lateralis erfolgte die Freilegung der Sehnen der Mm. fibulares brevis et longus in ihren Sehnenscheiden. Weiterhin wurden die Nn. cutanei dorsales lateralis et intermedius präpariert. Am Malleolus medialis wurden die Sehnen der Mm. tibialis posterior, flexor digitorum longus et flexor hallucis longus freigelegt sowie die Aa. tibialis posterior et plantaris medialis und die Nn. tibialis posterior, plantaris medialis et plantaris lateralis vom Bindegewebe befreit. An der vorderen Tibiakante wurde die Fascia cruris auf einer Länge von circa 15cm von der Tibia getrennt, um in die Extensorenloge des Unterschenkels zu gelangen. Hier erfolgte die Darstellung der Schraubenspitze bzw. des Schraubenkopfes, je nach Nageltyp, in Bezug auf die Lage der A. tibialis anterior und des N. fibularis profundus. Oberflächlich

wurden die V. saphena magna, der N. saphenus und der N. fibularis superficialis dargestellt. Am Tuber calcanei wurde das die Verriegelungsschraube umgebende Bindegewebe entfernt.

Diese Vorgehensweise wurde sowohl bei den 2 fixierten Amputatpaaren der Vorversuche als auch den 6 unfixierten und operierten Amputatpaaren angewendet. Die jeweiligen Präparationsschritte wurden photodokumentiert. Die geschädigten anatomischen Strukturen bzw. die Distanzen zwischen den eingebrachten Implantatanteilen und den anatomischen Strukturen wurden in Millimetern erfasst. Dabei wurde von Nagel- und Schraubenkopfaußenkante, sowie von der Schraubenspitze der kürzeste Abstand zur anatomischen Struktur gemessen. Die Messungen wurden mit einem Lineal bzw. mit einer Schublehre vorgenommen.

Die Bewertung der Schädigung, bzw. die gemessenen Abstände wurden für jedes Amputat und den entsprechend verwendeten Nagel bestimmt und in das folgende Untersuchungsblatt eingetragen:

Untersuchungsblatt:

Gefährdete anatomische Strukturen

Präparat vom

Präparatnummer:.....links / rechts

- ☐ Nageltyp 1 (Biomet-Nagel)
☐ Nageltyp 2 (Stryker-Nagel)

1. Nageleintrittsstelle

Anatomische Struktur	Grad der Schädigung bzw. Abstand in mm
- Aponeurosis plantaris	
- M. flexor digitorum brevis	
M. quadratus plantae	
M. abductor digiti minimi	
Tendo des M. fibularis longus	
M. abductor hallucis	
Tendo des M. flexor hallucis longus	
Tendo des M. flexor digitorum longus	
- A. plantaris medialis	
A. plantaris lateralis	
- N. plantaris medialis	
N. plantaris lateralis	
Ramus primus n. plantaris lateralis	
- Lig. plantare longum	

2. latero-mediale Verriegelung Calcaneus

Anatomische Struktur	Calcaneusschraube (Kopf bzw. Spitze)
- Retinacula mm. fibularium superius et inferius	
- Tendo des M. fibularis longus	
Tendo des M. fibularis brevis	
Tendo des M. tibialis posterior	
Tendo des M. flexor digitorum longus	
Tendo des M. flexor hallucis longus	
- A. tibialis posterior	
A. plantaris medialis	
- N. cutaneus dorsalis lateralis (Endast des N. suralis)	
N. cutaneus dorsalis intermedius (Ast des N. fibularis superficialis)	
N. tibialis posterior	
N. plantaris medialis	
N. plantaris lateralis	

3. latero-mediale Verriegelung Talus

Anatomische Struktur	Talusschraube
- Retinacula mm. fibularium superius et inferius	

- Tendo des M. fibularis longus	
Tendo des M. fibularis brevis	
Tendo des M. tibialis posterior	
Tendo des M. flexor digitorum longus	
Tendo des M. flexor hallucis longus	
- A. tibialis posterior	
A. plantaris medialis	
- N. cutaneus dorsalis lateralis (Endast des N. suralis)	
N. cutaneus dorsalis intermedius (Ast des N. fibularis superficialis)	
N. tibialis posterior	
N. plantaris medialis	
N. plantaris lateralis	

4. obere und untere Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes

proximale und distale Schraube

Anatomische Struktur	proximale Schraube	distale Schraube
- M. tibialis anterior		
M. extensor digitorum longus		
M. extensor hallucis longus		
- A. tibialis anterior		
V. saphena magna		
- N. saphenus		

N. fibularis profundus		
N. fibularis superficialis		

5. postero-anteriore Verriegelungsschraube Calcaneus

Breite des Achillessehnenansatzes	
Schraubenmitte von lateral	

Legende:

x... geschädigt

t... tangiert (0,00mm)

4.5. Fotodokumentation

Für die Fotodokumentation der Präparation stand eine digitale Spiegelreflexkamera der Firma Nikon, Typ D1x, mit entsprechendem Zubehör und zwei Objektive, Nikkor 2,8-3,5/28-105mm und Micro Nikkor 2,8/105mm, der gleichen Firma zur Verfügung. Übersichtsaufnahmen erforderten den Einsatz des Nikon Nikkor Objektives und einer Studioblitzanlage. Nahaufnahmen wurden mit dem Micro Nikkor Objektiv und einer Studioblitzanlage angefertigt. Zur Bildbearbeitung wurde das Programm Adobe Photoshop CS2 verwendet.

4.6. Statistische Analyse

Die Ergebnisse wurden für normal verteilte Daten mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test und dem Shapiro-Wilk-Test analysiert. Zur Feststellung einer Signifikanz wurden der Mann-Whitney-U-Test und der exakte Fisher-Test verwendet. Als Software stand SPSS (Statistical Package of the Social Sciences), Version 11.5, zur Verfügung. P-Werte von kleiner als 0,05 wurden als signifikant betrachtet.

5. Ergebnisse

5.1. Präparatorische Ergebnisse der gefährdeten Strukturen

Alle 6 Unterschenkelpaare konnten vollständig präpariert und ausgewertet werden. Dabei wurden die Präparate in unterschiedliche Interessenregionen eingeteilt.

Diese lauteten wie folgt:

Nageleintrittsstelle, latero-mediale Verriegelung Calcaneus, latero-mediale Verriegelung Talus, obere und untere Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes und postero-anteriore Verriegelungsschraube Calcaneus.

Insgesamt wurden 3 Bandstrukturen, 7 Muskeln, 5 Sehnen, 5 Gefäße und 9 Nerven betrachtet, wobei die anatomisch-funktionelle und klinische Relevanz der anatomischen Struktur entscheidend war. Bei der Schädigung der Muskeln bzw. ihrer Sehnen wurde jeweils nur der Name des Muskels verwendet.

Während der Präparation der 12 operierten Amputate wurden die gefährdeten relevanten anatomischen Strukturen identifiziert, bilddokumentiert und ihre Lage zum Implantat vermessen. Einzelne relevante anatomische Strukturen tangierten den Nagel oder die Schrauben und wiesen aber keine Anzeichen einer Schädigung auf. Diese Fälle gingen mit einer Entfernung von 0,00mm in die Wertetabelle ein.

5.1.1. Nageleintrittsstelle

Die Ergebnisse der Abstandsmessung bzw. der Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen an der Nageleintrittsstelle sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Im Bereich der Nageleintrittsstelle wurde die Aponeurosis plantaris durch den Nageltyp 1 in 83,3% der Operationen geschädigt (Abb. 25) und bei dem Nageltyp 2 in 33,3%. Bei der Aponeurosis plantaris wurde im Fall einer Schädigung die laterale Seite im dorsalen Drittel traumatisiert, was durch die Präparation bzw. durch das Bohren bei der Operation verursacht wurde.

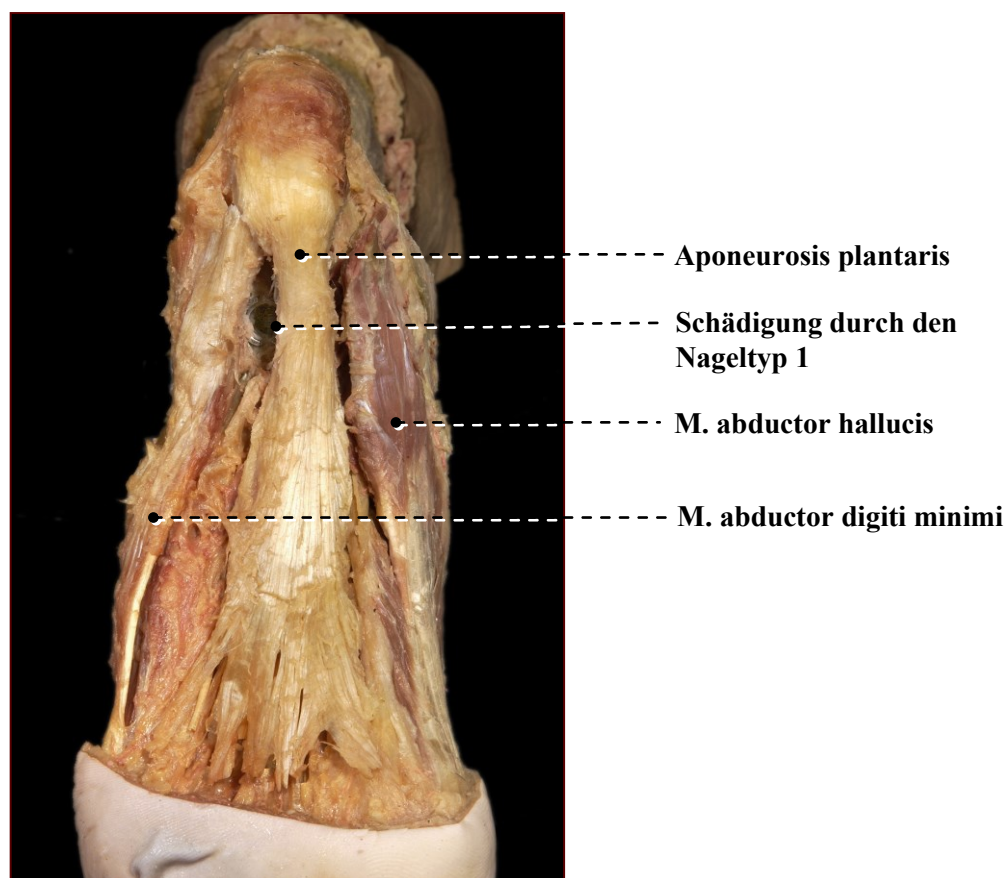


Abb. 25: Schädigung der lateralen Seite der Aponeurosis plantaris durch den Nageltyp 1 an einem linken Fuß

Der unter der Aponeurosis plantaris gelegene M. flexor digitorum brevis wurde durch den Nageltyp 1 in 100% und durch den Nageltyp 2 in 66,7% (Abb. 26) geschädigt.

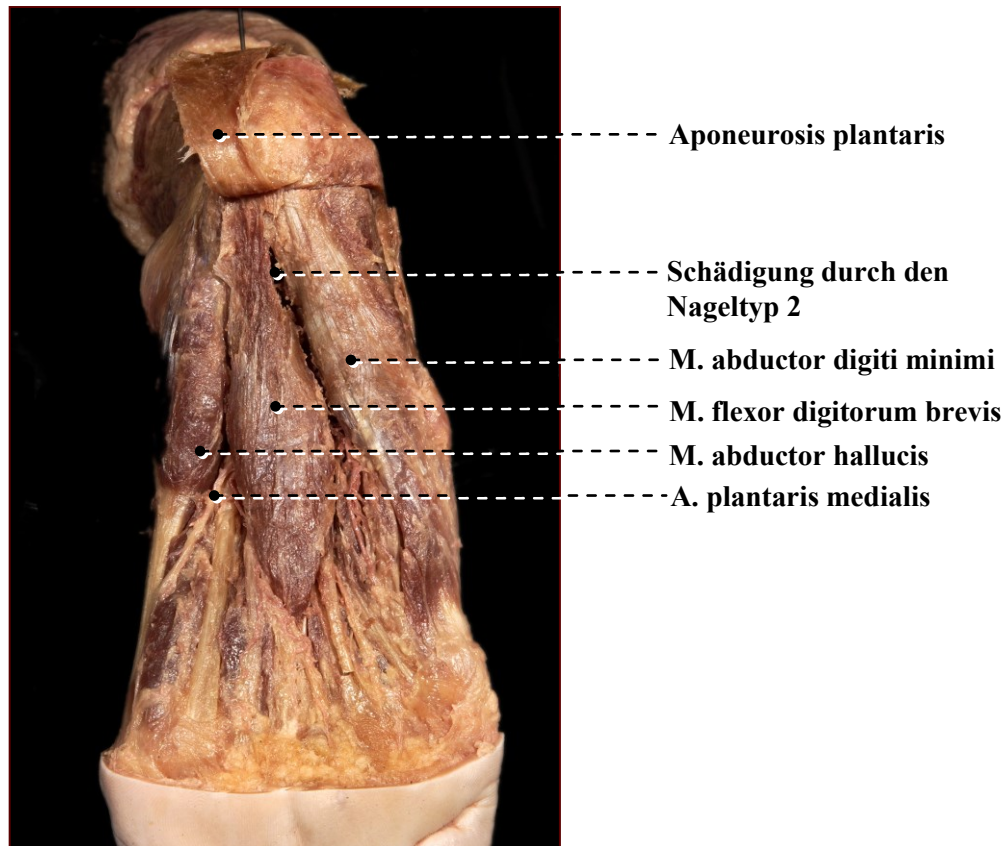


Abb. 26: Schädigung des M. flexor digiti minimi durch den Nageltyp 2 an einem rechten Fuß

Der lateral der Nageleintrittsstelle gelegene M. abductor digiti minimi wurde durch den Nageltyp 1 in 100% (Abb. 27) und durch den Nageltyp 2 in 50% geschädigt.

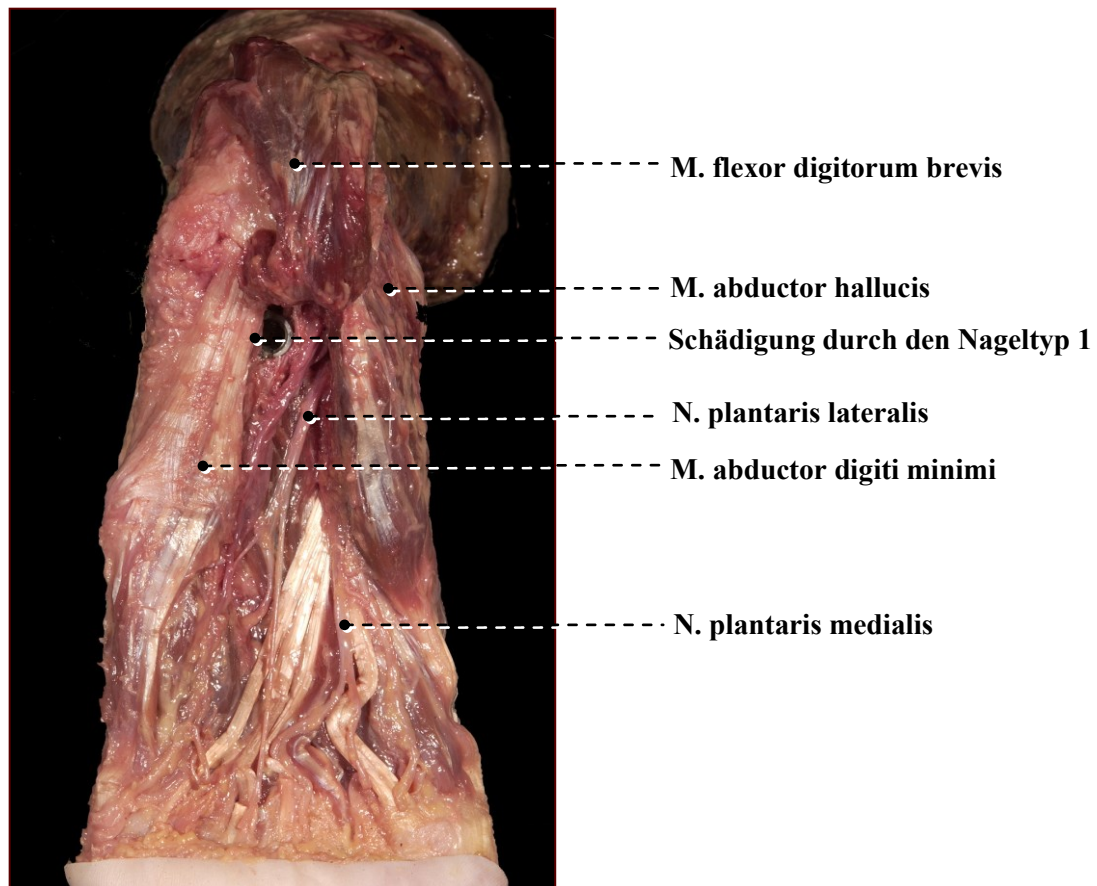


Abb. 27: Schädigung des M. abductor digiti minimi durch den Nageltyp 1 an einem linken Fuß

Der kranial des M. flexor digitorum brevis liegende, und an der Sehne des M. flexor digitorum longus verankerte M. quadratus plantae wurde von beiden Nageltypen in 100% (Abb. 28) geschädigt. Diese hohe Wahrscheinlichkeit der Schädigung lag an dem Eintrittspunkt der Nägel, welcher sich im Ursprungsgebiet des M. quadratus plantae befand.

Das Lig. plantare longum welches direkt auf der Unterseite des Calcaneus inseriert, wurde vom Nageltyp 1 in 50% und vom Nageltyp 2 in 100% geschädigt (Abb. 28 und 29).

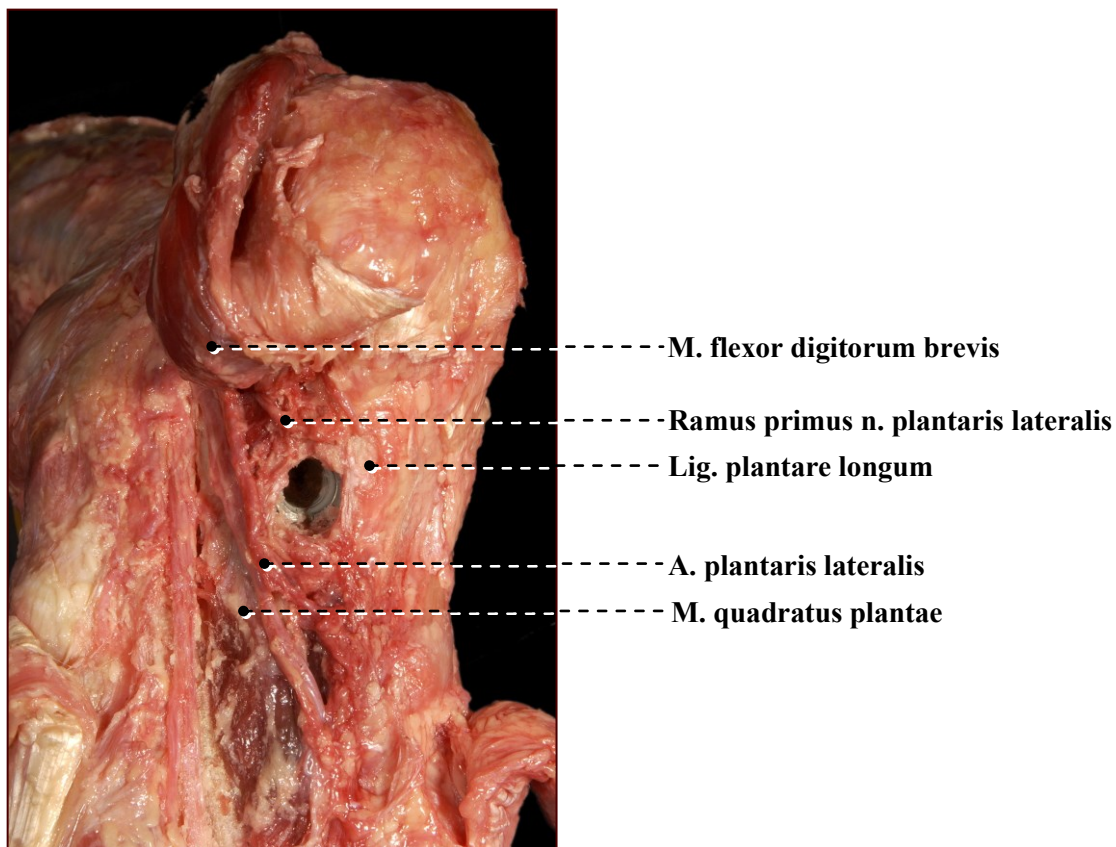


Abb. 28: Schädigung des M. quadratus plantae, dessen Fasern unter den Gefäßen und Nerven (A. und N. plantaris lateralis) verlaufen, durch den Nageltyp 1 an einem rechten Fuß

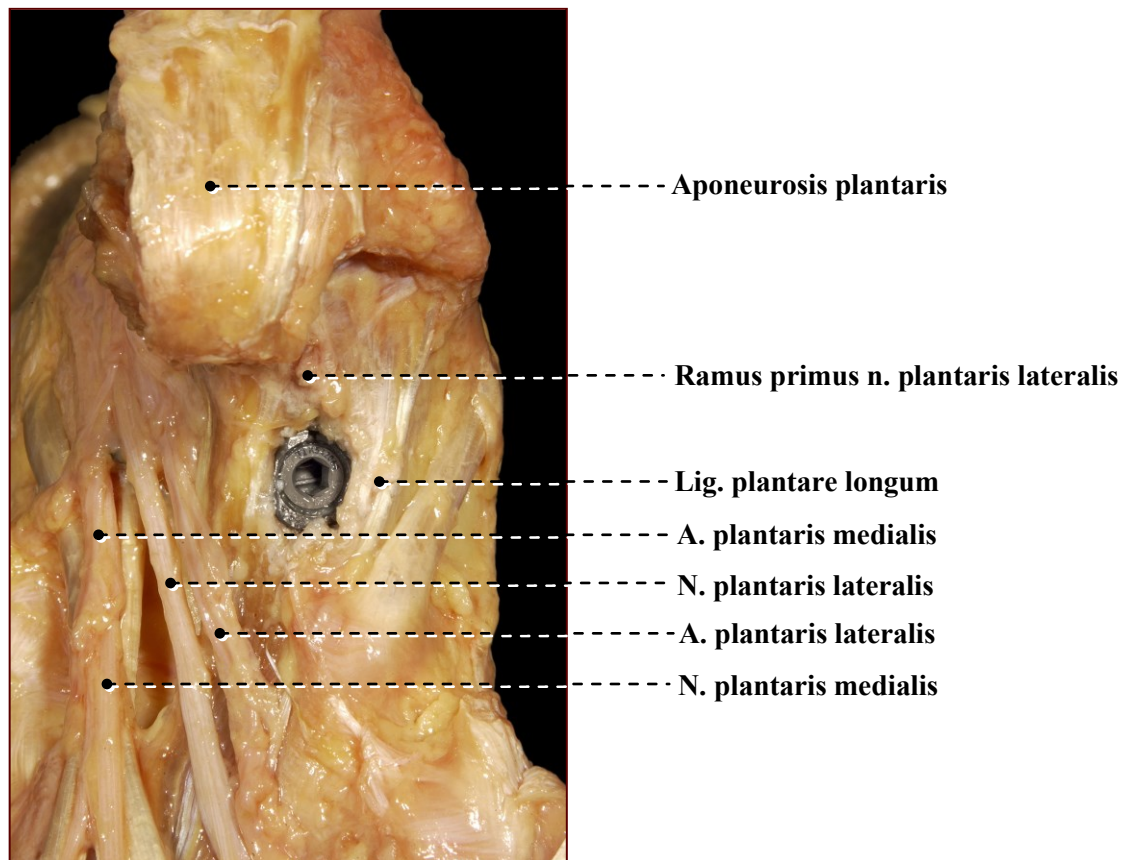


Abb. 29: Schädigung des Lig. plantare longum durch den Nageltyp 2 an einem rechten Fuß

Weiterhin lagen in unmittelbarer Umgebung relevante anatomische Strukturen, die mehr oder minder einem Risiko der Schädigung ausgesetzt waren. Bei diesen Strukturen handelte es sich um weitere vier Muskeln. Die Sehne des M. fibularis longus (Abb. 30) lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 14,2mm und beim Nageltyp 2 mit 11,3mm vom Nagelrand entfernt, mit Einzelwerten beim Nageltyp 1 zwischen 8 und 17mm und beim Nageltyp 2 zwischen 5 und 20mm. Der medial gelegene M. abductor hallucis (Abb. 30) lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 12,2mm und beim Nageltyp 2 mit 13,5mm vom Nagelrand entfernt; die Einzelwerte beim Nageltyp 1 lagen zwischen 7 und 19mm und beim Nageltyp 2 zwischen 5 und 19mm. Die Sehne des M. flexor digitorum longus (Abb. 30) lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 18,2mm und beim Nageltyp 2 mit 21,2mm vom Nagelrand entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 13 und 21mm und beim Nageltyp 2 zwischen 15 und 25mm. Die Sehne des M. flexor hallucis longus (Abb. 30), welche in Nagelnähe größtenteils durch die Sehne des M. flexor

digitorum longus bedeckt wird, lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 10,7mm und beim Nageltyp 2 mit 16,3mm entfernt. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 8 und 15mm und beim Nageltyp 2 zwischen 10 und 24mm.

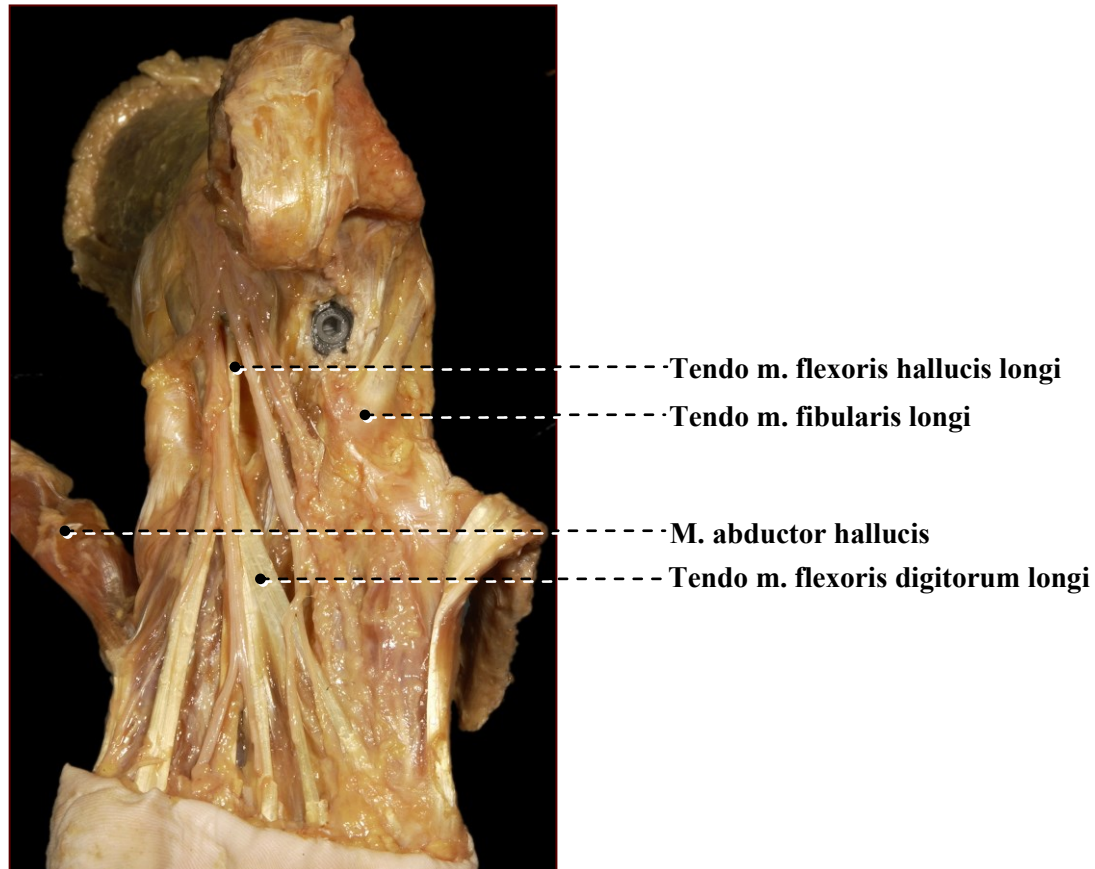


Abb. 30: Weitere sich in unmittelbarer Umgebung befindende Muskeln bzw. deren Sehnen an einem rechten Fuß mit dem Nageltyp 2

Bei den beiden relevanten Arterien in der Nähe der Nageleintrittsstelle handelte es sich um die A. plantaris medialis und die A. plantaris lateralis (Abb. 31 und 32).

Die A. plantaris medialis (Abb. 31 und 32) lag durchschnittlich vom Nageltyp 1 mit 13,8mm und vom Nageltyp 2 mit 18,3mm zum Nagelrand entfernt und wies Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 9 und 17mm und beim Nageltyp 2 zwischen 12 und 21mm auf. Die näher an der Nageleintrittsstelle liegende A. plantaris lateralis (Abb. 31 und 32) wies durchschnittlich Entfernungen zum Nageltyp 1 mit 2,3mm und zum Nageltyp 2 mit 6,0mm auf. Die Abstandswerte zum Nagelrand lagen beim Nageltyp 1 zwischen 0,00 und 5mm und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00 und 10mm.

Die 3 relevanten Nerven in der Nähe der Nageleintrittsstelle sind der N. plantaris medialis, der N. plantaris lateralis und einer seiner Äste, der R. primus n. plantaris lateralis, welcher dorsal des Nagels verläuft (Abb. 31 und 32).

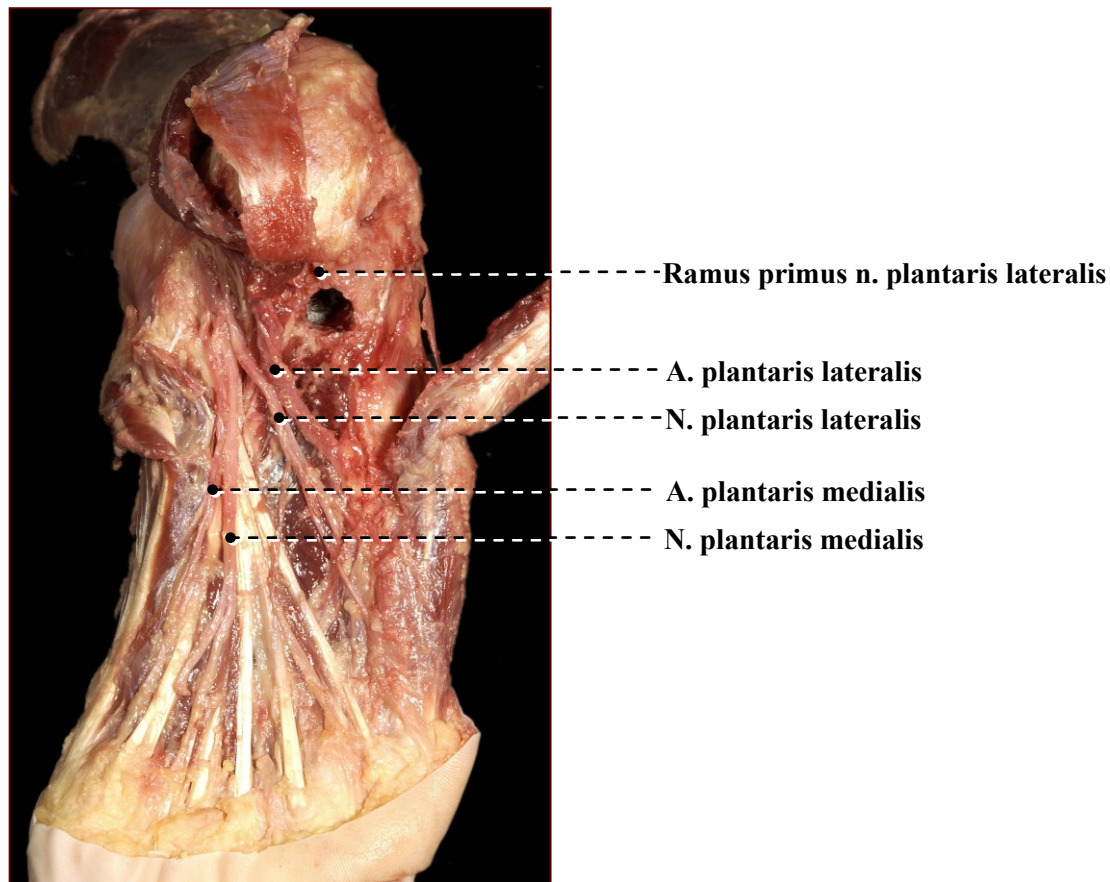


Abb. 31: Übersicht der Arterien und Nerven an der Nageleintrittsstelle an einem rechten Fuß mit dem Nageltyp 2

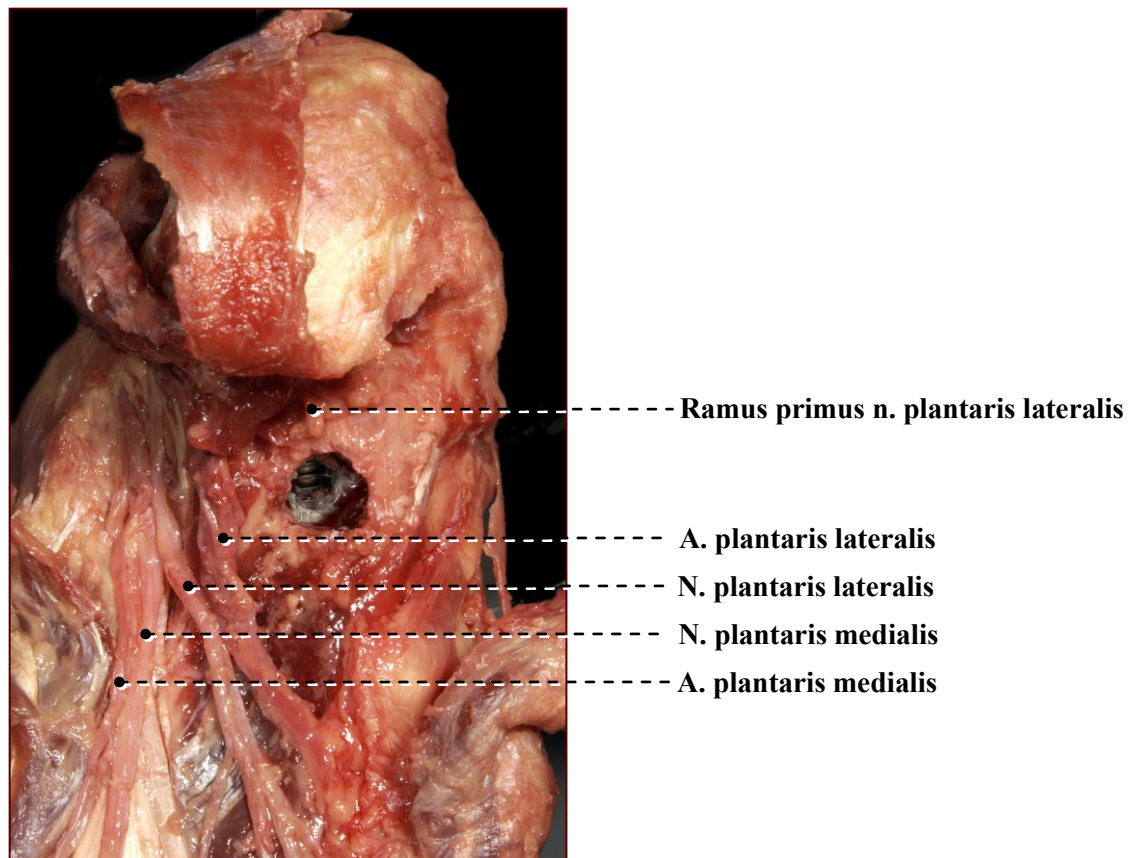


Abb. 32: Nahaufnahme der Abb. 27 mit Darstellung der Arterien und Nerven an der Nageleintrittsstelle von einem rechten Fuß mit dem Nageltyp 2

Die Entfernung des N. plantaris medialis (Abb. 31 und 32) vom Nagelrand wies durchschnittliche Werte beim Nageltyp 1 mit 15,2mm und beim Nageltyp 2 mit 19,3mm auf, wobei die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 10 und 19mm und beim Nageltyp 2 zwischen 14 und 25mm lagen. Der der Nageleintrittsstelle näher gelegene N. plantaris lateralis (Abb. 31 und 32) war durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 5,2mm und beim Nageltyp 2 mit 9,0mm vom Nagelrand entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 2 und 8mm und beim Nageltyp 2 zwischen 5 und 12mm. Der R. primus n. plantaris lateralis (Abb. 31 und 32) lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 7,2mm und beim Nageltyp 2 mit 9,5mm vom Nagelrand entfernt; die Einzelwerte wiesen Werte beim Nageltyp 1 zwischen 5 und 10mm und beim Nageltyp 2 Werte zwischen 4 und 14mm auf. Signifikante Unterschiede (p in Klammern) ergaben sich bei drei relevanten anatomischen Strukturen, dies waren die Sehne des M. flexor hallucis longus ($p = 0,041$), die A. plantaris medialis ($p = 0,026$) und der N. plantaris lateralis ($p = 0,026$). Hier ergab sich ein größerer Abstand für den Nageltyp 2.

Tabelle 1: Übersicht über Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen an der Nageleintrittsstelle.

	Nageltyp 1					Nageltyp 2					
	x	nicht x	Abstand [mm]			x	nicht x	Abstand [mm]			
anatomische Strukturen	n	n	mean	SD	range	n	n	mean	SD	range	p
Nageleintrittsstelle											
Aponeurosis plantae	5	1	-	-	x – t	2	4	-	-	x – t	0,121
M. flexor digitorum brevis	6	0	-	-	x	4	2	-	-	x – t	0,227
M. quadratus plantae	6	0	-	-	x	6	0	-	-	x	1,0
M. abductor digiti minimi	6	0	-	-	x	3	3	-	-	x – t	0,091
Tendo m. fibularis longi	0	6	14,2	3,2	8-17	0	6	11,3	5,6	5-20	0,180
M. abductor hallucis	0	6	12,2	4,1	7-19	0	6	13,5	4,7	5-19	0,394
Tendo m. flexoris hallucis longi	0	6	10,7	2,5	8-15	0	6	16,3	5,5	10-24	0,041
Tendo m. flexoris digitorum longi	0	6	18,2	2,9	13-21	0	6	21,2	3,7	15-25	0,093
A. plantaris medialis	0	6	13,8	3,1	9-17	0	6	18,3	3,4	12-21	0,026
A. plantaris lateralis	0	6	2,33	2,3	0-5	0	6	6,0	3,5	0-10	0,065
N. plantaris medialis	0	6	15,2	3,1	10-19	0	6	19,3	4,5	14-25	0,132
N. plantaris lateralis	0	6	5,2	2,2	2-8	0	6	9,0	2,8	5-12	0,026
R. primus n. plantaris lateralis	0	6	7,2	1,7	5-10	0	6	9,5	4,4	4-14	0,485
Lig. plantare longum	3	3	-	-	x – t	6	0	-	-	x	0,091

(Bei zwei p Werten bezieht sich der 1. auf die Schädigung und der 2. auf den Abstand.)

n.....Anzahl
x.....geschädigt

p.....Signifikanz (**p < 0,05 rot**)
t.....tangiert, entspricht 0,00mm

5.1.2. Latero-mediale Verriegelung Calcaneus

Die Ergebnisse der Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf potentielle Schädigung relevanter anatomischer Strukturen bei der latero-medialen Verriegelung im Calcaneus sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Messungen der Abstände, bzw. die Schädigungen wurden einerseits von der Schraubenspitze aus und andererseits vom Schraubenkopf aus bestimmt, so dass potentiell gefährdete Strukturen der medialen und lateralen Fußseite berücksichtigt wurden.

Das an der lateralen Fußseite gelegene Retinaculum musculorum fibularium inferius (Abb. 34) wurde operativ durch den Nageltyp 1 in 83,3% und durch den Nageltyp 2 in 66,7% geschädigt. Die durch das Retinaculum musculorum fibularium inferius am lateralen Fußrand gehaltene Sehne des M. fibularis longus (Abb. 33 und 34) war vom Nageltyp 1 im Durchschnitt mit 4,7mm und vom Nageltyp 2 mit 7,7mm entfernt, wobei die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 2 und 13mm und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00 und 11mm lagen.

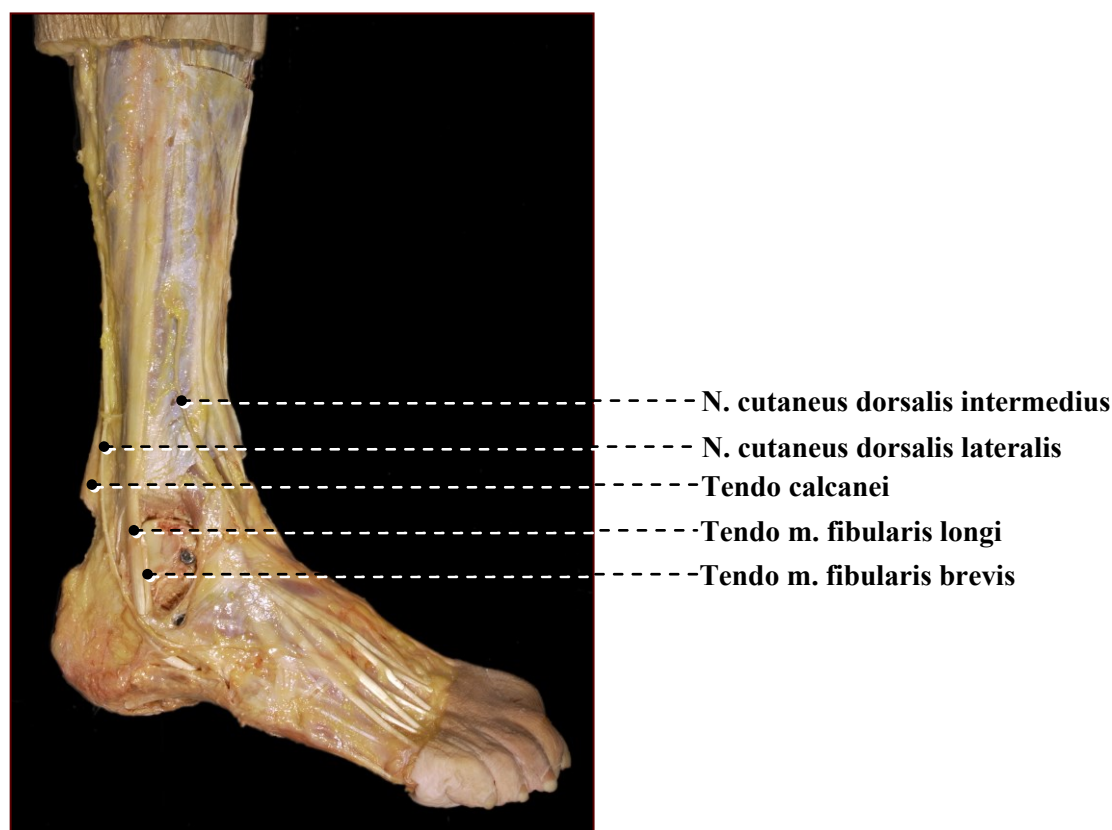


Abb. 33: Übersicht der Regio malleolaris lateralis nach Resektion der distalen Fibula. Nageltyp 2 an einem rechten Fuß

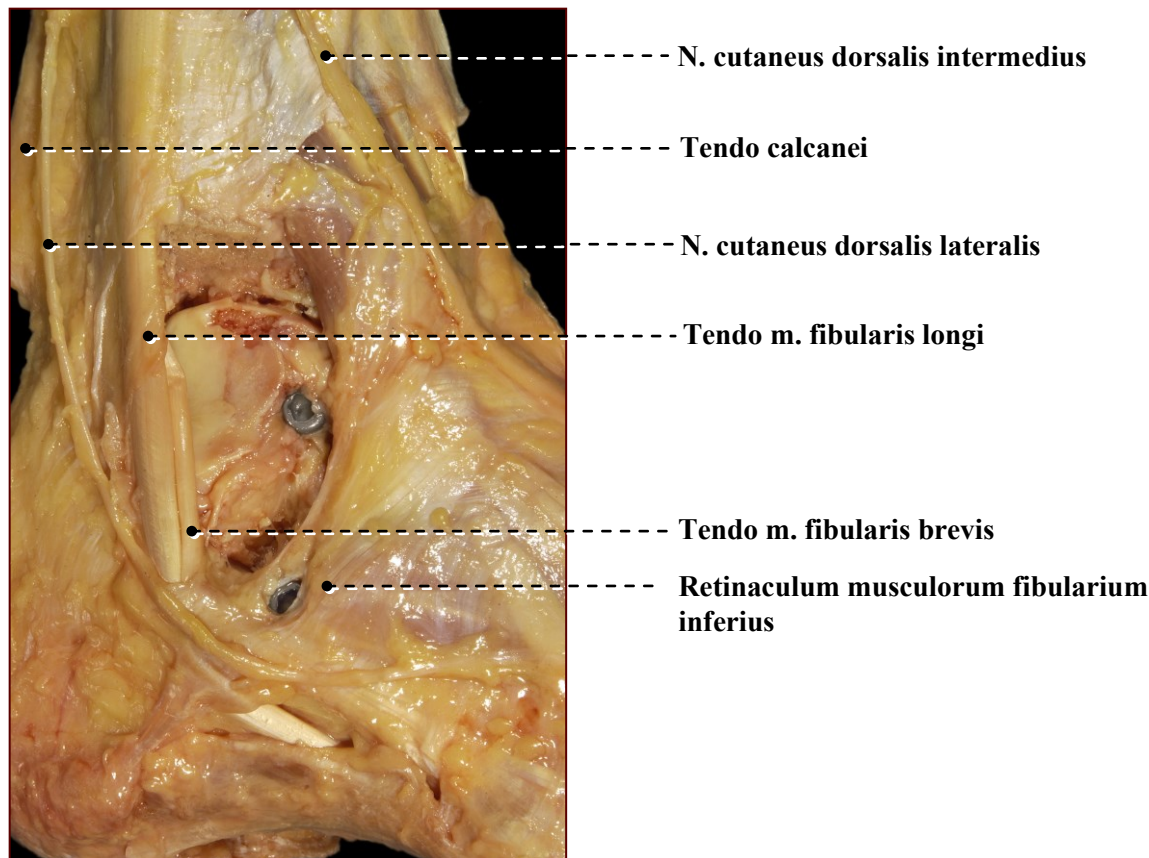


Abb. 34: Nahaufnahme der Regio malleolaris lateralis mit Schädigung des Retinaculum musculorum fibularium inferius. Nageltyp 2 an einem rechten Fuß

Die unter der Sehne des M. fibularis longus und ursprünglich in einer Knochenrinne der Fibula laufende Sehne des M. fibularis brevis (Abb. 33 und 34) wurde durch den Nageltyp 1 in 66,67% geschädigt; blieb dagegen durch den Nageltyp 2 unberührt. Die Mittelwerte lagen beim Nageltyp 1 bei 1,8mm und beim Nageltyp 2 bei 3,3mm; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 neben den vier Schädigungen und 11mm, und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00 und 7mm.

Die durchschnittlichen Entfernungen der durch den Sulcus malleoli laufenden Sehne des M. tibialis posterior (Abb. 35) war bei beiden Nageltypen mit 11,3mm gleich; die jeweiligen Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 5 und 18mm und beim Nageltyp 2 zwischen 4 und 18mm. Die Sehne des M. flexor digitorum longus (Abb. 35), welcher den M. tibialis posterior am Unterschenkel überkreuzt, wurde beim Nageltyp 1 in 33,33% und beim Nageltyp 2 in 16,67% geschädigt. Durchschnittlich war die Sehne beim Nageltyp 1 mit 4,5mm und beim Nageltyp 2 mit 2,0mm entfernt, die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen zwei Schädigungen und 11mm

und beim Nageltyp 2 zwischen einer Schädigung und 8mm. Der M. flexor hallucis longus (Abb. 35) wurde durch den Nageltyp 1 nicht und durch den Nageltyp 2 in 50% der Fälle geschädigt. Die Entfernungen lagen im Durchschnitt beim Nageltyp 1 bei 6,3mm und beim Nageltyp 2 bei 4,5mm; die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 3 und 10mm und beim Nageltyp 2 zwischen drei Schädigungen und 10mm.

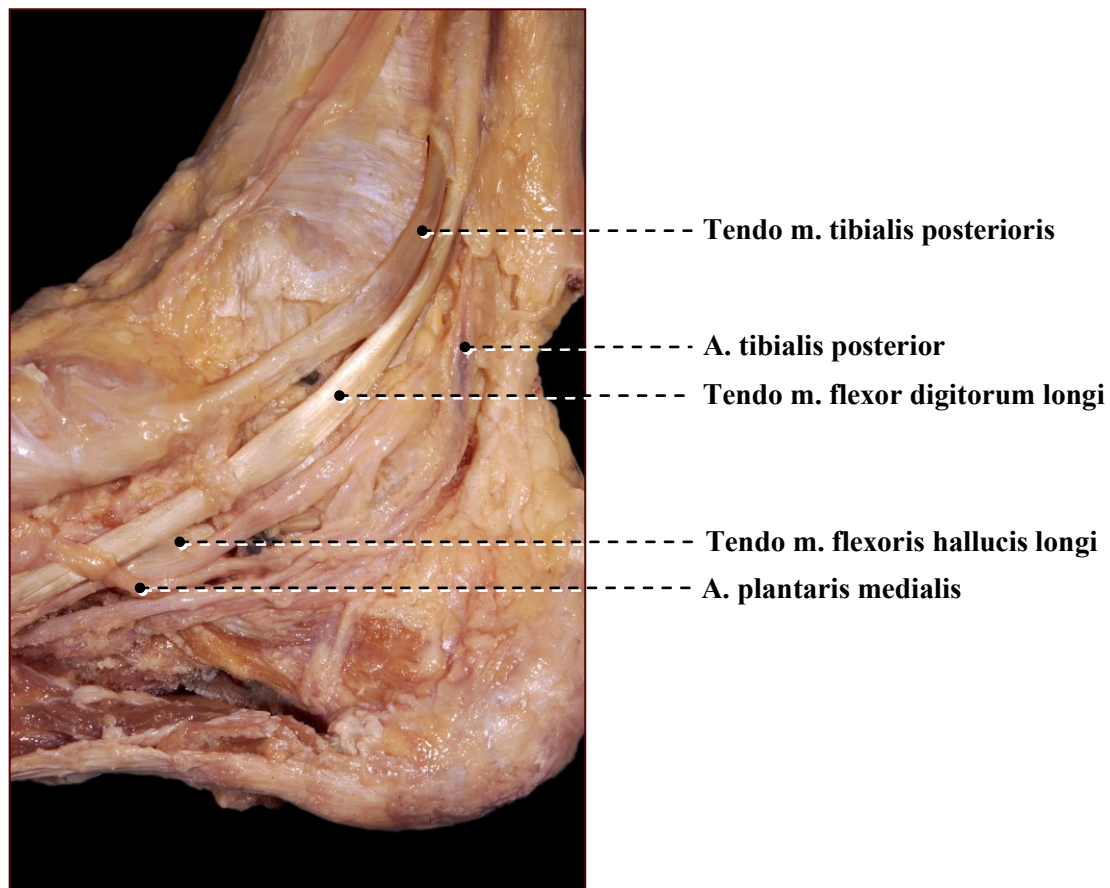


Abb. 35: Aufnahme der Regio malleolaris medialis mit dem Nageltyp 2 an einem rechten Fuß

Bei der latero-medialen Verriegelung des Calcaneus wurden zwei Arterien in der Regio malleolaris medialis betrachtet lagen. Es handelte sich um die A. tibialis posterior und ihren schwächeren Endast, die A. plantaris medialis. Der stärkere Endast der A. tibialis posterior, die A. plantaris lateralis, wurde hier nicht in Betracht gezogen, da sie bei allen Präparaten in sicherer Entfernung vom OP-Gebiet lag.

Die A. tibialis posterior (Abb. 35) lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 23,8mm und beim Nageltyp 2 mit 19,5mm entfernt, wobei sich die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 19 und 29mm und beim Nageltyp 2 zwischen 7 und 26mm befanden. Die A. plantaris medialis (Abb. 35) war im Durchschnitt beim Nageltyp 1 mit 11,8mm und beim Nageltyp 2 mit 7,3mm entfernt. Die entsprechenden Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 9 und 16mm und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00 und 12mm.

Von den fünf relevanten Nerven im latero-medialen Verriegelungsgebiet des Calcaneus verliefen zwei - der N. cutaneus dorsalis lateralis (Endast des N. suralis) und der N. cutaneus dorsalis intermedius (Ast des N. fibularis superficialis) - auf der lateralen Fußseite bzw. dem Fußrücken. Die anderen drei Nerven - der N. tibialis posterior und seine beiden Endäste, die Nn. plantaris medialis et lateralis - verliefen auf der medialen Fußseite.

Der N. cutaneus dorsalis lateralis (Abb. 36) war beim Nageltyp 1 im Durchschnitt mit 9,5mm und beim Nageltyp 2 mit 15,5mm entfernt, wobei die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 5 und 14mm und beim Nageltyp 2 zwischen 4 und 32mm lagen. Der weiter medial verlaufende N. cutaneus dorsalis intermedius (Abb. 36) war durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 39mm und beim Nageltyp 2 mit 41,5mm entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 30 und 46mm und beim Nageltyp 2 zwischen 38 und 47mm.

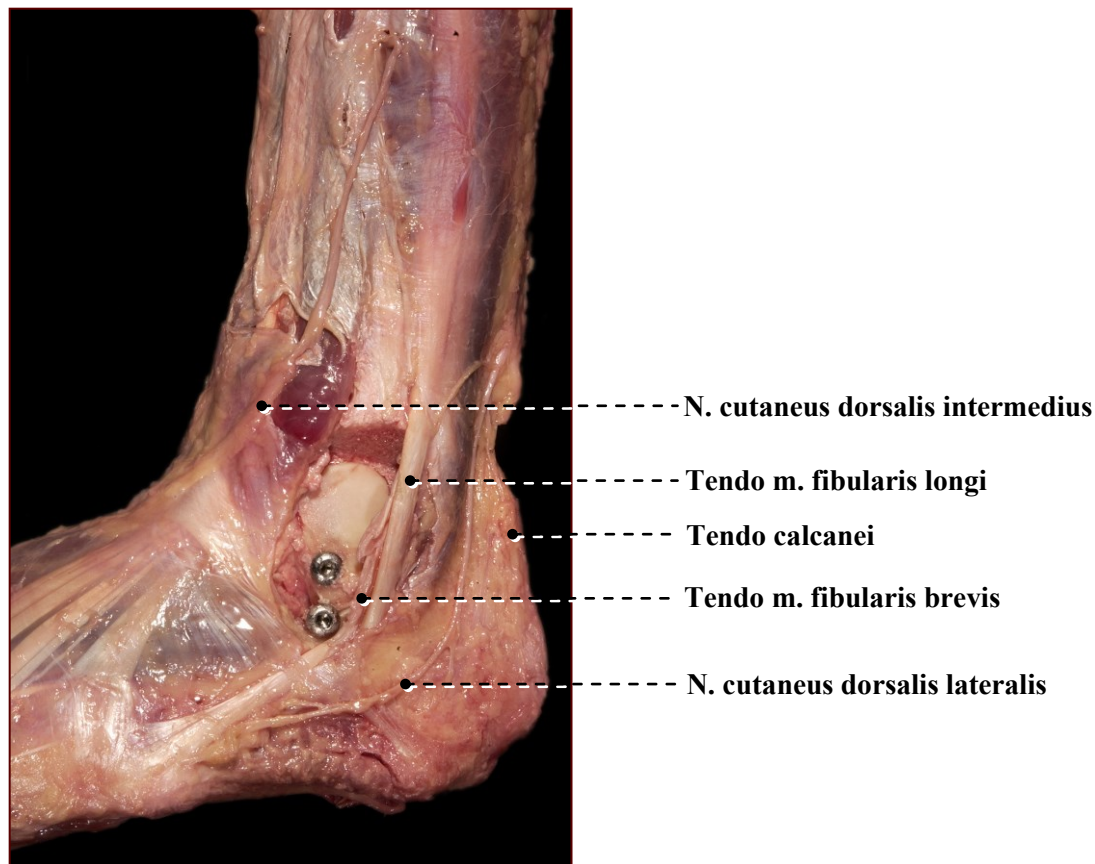


Abb. 36: Aufnahme der Regio malleolaris lateralis mit dem Nageltyp 1 an einem linken Fuß

Der auf der medialen Fußseite gelegene N. tibialis posterior (Abb. 37) war im Durchschnitt beim Nageltyp 1 mit 25,7mm und beim Nageltyp 2 mit 27,7mm entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 20 und 31mm und beim Nageltyp 2 zwischen 9 und 45mm. Der sich vom N. tibialis posterior abspaltende N. plantaris medialis (Abb. 37) war im Durchschnitt beim Nageltyp 1 mit 9,8mm und beim Nageltyp 2 mit 4,7mm von der Schraubenspitze entfernt. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 8 und 14mm und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00 und 11mm. Bei dem ebenfalls vom N. tibialis posterior abgehenden N. plantaris lateralis (Abb. 37) lagen die Entfernungen durchschnittlich beim Nageltyp 1 bei 14,3mm und beim Nageltyp 2 bei 13,2mm; die Einzelwerte befanden sich beim Nageltyp 1 zwischen 12 und 19mm und beim Nageltyp 2 zwischen 4 und 24mm.

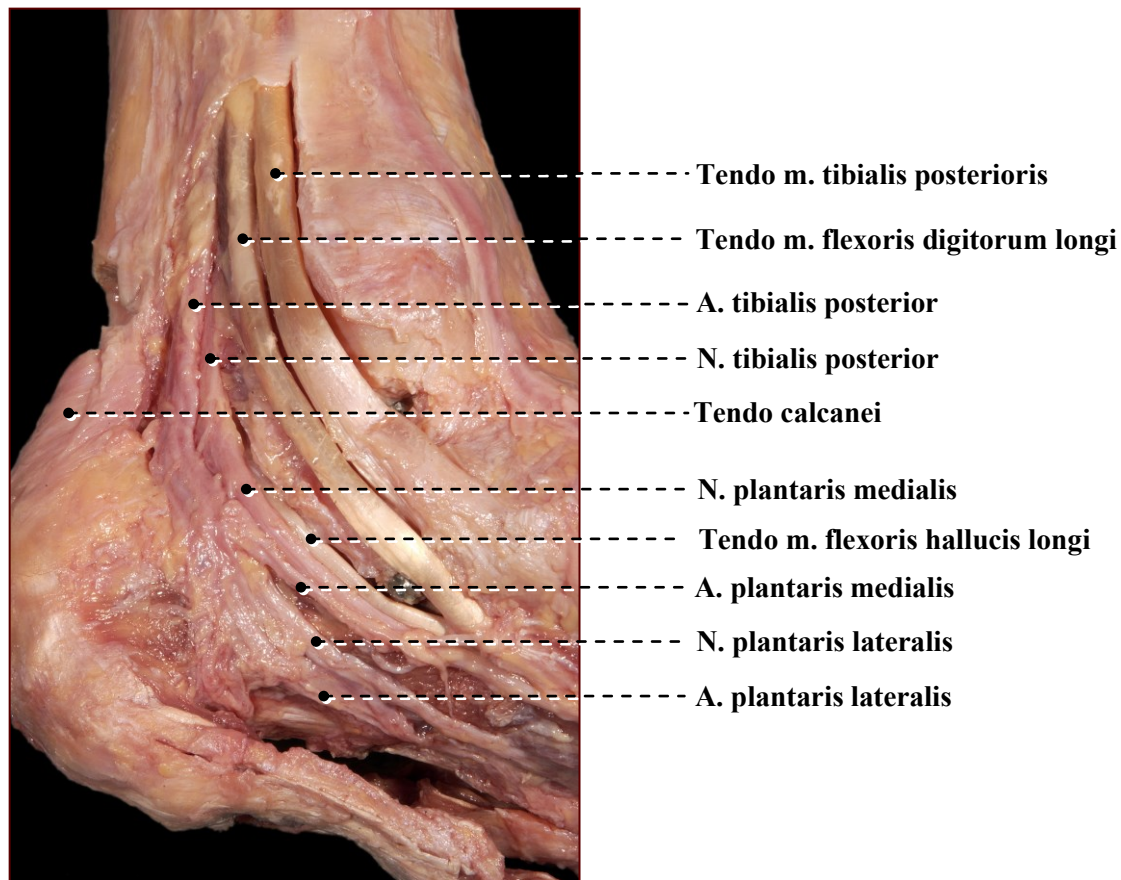


Abb. 37: Aufnahme der Regio malleolaris medialis mit dem Nageltyp 2 an einem linken Fuß

Signifikante Unterschiede (p in Klammern) ergaben sich bei zwei relevanten anatomischen Strukturen, der Sehne des M. fibularis brevis und dem N. plantaris medialis. Die Sehne des M. fibularis brevis ($p = 0,03$) wurde durch den Nageltyp 2 signifikant weniger geschädigt; es zeigte sich jedoch keine Signifikanz in der Entfernung zum Schraubenkopf zwischen beiden Nageltypen. Der N. plantaris medialis ($p = 0,041$) lag vom Nageltyp 1 signifikant weiter entfernt.

Tabelle 2: Übersicht über Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen an der latero-medialen Verriegelung im Calcaneus.

	Nageltyp 1					Nageltyp 2					
	x	nicht x	Abstand [mm]			x	nicht x	Abstand [mm]			
anatomische Strukturen	n	n	mean	SD	range	n	n	mean	SD	range	p
latero-mediale Verriegelung Calcaneus											
Retinaculum mm. fibularium inf.	5	1	-	-	x – t	4	2	-	-	x – t	0,5
Tendo m. fibularis longi	0	6	4,7	4,1	2 – 13	0	6	7,7	4,3	t – 11	0,31
Tendo m. fibularis brevis	4	2	1,8	4,5	x – 11	0	6	3,3	2,9	t – 7	0,03 / 0,31
Tendo m. tibialis posterioris	0	6	11,3	5,2	5 – 18	0	6	11,3	5,28	4 – 18	0,937
Tendo m. flexoris digitorum longi	2	4	4,5	4,6	x – 11	1	5	2,0	3,4	x – 8	0,284 / 0,31
Tendo m. flexoris hallucis longi	0	6	6,3	2,6	3 – 10	3	3	4,5	5,0	x – 10	0,091 / 0,699
A. tibialis posterior	0	6	23,8	3,4	19–29	0	6	19,5	7,1	7 – 26	0,310
A. plantaris medialis	0	6	11,8	2,6	9 – 16	0	6	7,3	4,4	t – 12	0,093
N. cutaneus dorsalis lateralis	0	6	9,5	3,1	5–14	0	6	15,5	10,8	4 – 32	0,394
N. cutaneus dorsalis intermedius	0	6	39,0	6,8	30–46	0	6	41,5	3,4	38 – 47	0,699
N. tibialis posterior	0	6	25,7	4,8	20–31	0	6	27,7	12,3	9 – 45	0,589
N. plantaris medialis	0	6	9,8	2,2	8 – 14	0	6	4,7	4,2	t – 11	0,041
N. plantaris lateralis	0	6	14,3	2,4	12–19	0	6	13,2	7,7	4 – 24	0,818

(Bei zwei p Werten bezieht sich der 1. auf die Schädigung und der 2. auf den Abstand.)

n.....Anzahl
x.....geschädigt

p.....Signifikanz (**p < 0,05 rot**)
t.....tangiert, entspricht 0,00mm

5.1.3. Latero-mediale Verriegelung Talus

Die Ergebnisse der Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen von der latero-medialen Verriegelung im Talus sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Messungen der Abstände, bzw. die Schädigungen wurden zum einem von der Schraubenspitze und zum anderen vom Schraubenkopf aus bestimmt, so dass relevante anatomische Strukturen der medialen und der lateralen Fußseite mit berücksichtigt wurden.

Das an der lateralen Fußseite gelegene Retinaculum musculorum fibularium inferius (Abb. 34) wurde durch den Nageltyp 1 in 66,7% und ebenso vom Nageltyp 2 in 66,7% der Operationen geschädigt. Die durchschnittliche Entfernung lag beim Nageltyp 1 bei 1mm und beim Nageltyp 2 bei 1,7mm; die Einzelwerte beim Nageltyp 1 lagen zwischen vier Schädigungen und 6mm und beim Nageltyp 2 zwischen vier Schädigungen und 10mm. Die durch das Retinaculum musculorum fibularium inferius am lateralen Fußrand gehaltene Sehne des M. fibularis longus (Abb. 33 und 34) war vom Nageltyp 1 im Durchschnitt mit 7,5mm und vom Nageltyp 2 mit 17mm entfernt, wobei die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 3 und 10mm und beim Nageltyp 2 zwischen 5 und 23mm lagen. Die unter der Sehne des M. fibularis longus laufende Sehne des M. fibularis brevis (Abb. 33 und 34) lag beim Nageltyp 1 im Durchschnitt mit 4,3mm und vom Nageltyp 2 mit 14,8mm entfernt; die Einzelwerte beim Nageltyp 1 lagen zwischen 0,00 und 7mm und beim Nageltyp 2 zwischen 6 und 20mm. Bei der Operation wurde die Sehne des M. tibialis posterior (Abb. 35) beim Nageltyp 1 in keinem Fall und beim Nageltyp 2 in 16,67% der Fälle geschädigt. Die durchschnittliche Entfernung der Sehne des M. tibialis posterior lag beim Nageltyp 1 bei 3,7mm und beim Nageltyp 2 bei 4,7mm; die jeweiligen Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 0,00 und 5mm und beim Nageltyp 2 zwischen einer Schädigung und 7mm. Die Sehne des M. flexor digitorum longus (Abb. 35) wurde beim Nageltyp 1 in 16,67% und beim Nageltyp 2 in keinem Fall geschädigt. Durchschnittlich war die Sehne des M. flexor digitorum longus beim Nageltyp 1 mit 6mm und beim Nageltyp 2 mit 10mm entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen einer Schädigungen und 16mm und beim Nageltyp 2 zwischen 6 und 16mm. Beim M. flexor hallucis longus (Abb. 35) lagen die Entfernungen im Durchschnitt beim Nageltyp 1 bei 17,5mm und beim Nageltyp 2 bei 22,5mm; die Einzelwerte beim Nageltyp 1 lagen zwischen 14 und 24mm und beim Nageltyp 2 zwischen 16 und 30mm.

Bei der latero-medialen Verriegelung im Talus wurden, ebenso wie am Calcaneus, zwei Arterien betrachtet, welche beide in der Regio malleolaris medialis verlaufen. Es handelte sich um die A.

tibialis posterior und ihren schwächeren Endast, die A. plantaris medialis. Die A. tibialis posterior (Abb. 35) lag durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 27mm und beim Nageltyp 2 mit 25,3mm entfernt, wobei die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 22 und 34mm und beim Nageltyp 2 zwischen 14 und 33mm lagen. Die A. plantaris medialis (Abb. 35) war im Durchschnitt beim Nageltyp 1 mit 24,3mm und beim Nageltyp 2 mit 27,5mm entfernt. Die entsprechenden Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 21 und 28mm und beim Nageltyp 2 zwischen 17 und 35mm. Von den fünf relevanten Nerven im latero-medialen Verriegelungsgebiet des Talus kamen zwei, der N. cutaneus dorsalis lateralis (Endast des N. suralis) und der N. cutaneus dorsalis intermedius (Ast des N. fibularis superficialis) als potentiell gefährdet in Betracht, da sie auf der lateralen Fußseite bzw. dem Fußrücken verlaufen. Die anderen drei Nerven, der N. tibialis posterior und seine beiden Endäste, der N. plantaris medialis und der N. plantaris lateralis, verlaufen auf der medialen Fußseite. Der N. cutaneus dorsalis lateralis (Abb. 36) war beim Nageltyp 1 im Durchschnitt mit 20,5mm und beim Nageltyp 2 mit 25mm entfernt, wobei die Einzelwerte beim Nageltyp 1 zwischen 13 und 25mm und beim Nageltyp 2 zwischen 10 und 34mm lagen. Der medialer verlaufende N. cutaneus dorsalis intermedius (Abb. 36) war durchschnittlich beim Nageltyp 1 mit 30,7mm und beim Nageltyp 2 mit 24,2mm entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 22 und 39mm und beim Nageltyp 2 zwischen 17 und 29mm. Der auf der medialen Fußseite gelegene N. tibialis posterior (Abb. 37) war im Durchschnitt beim Nageltyp 1 mit 25,3mm und beim Nageltyp 2 mit 24mm entfernt; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 24 und 31mm und beim Nageltyp 2 zwischen 17 und 30mm. Der sich vom N. tibialis posterior abspaltende N. plantaris medialis (Abb. 37) war im Durchschnitt beim Nageltyp 1 mit 22,8mm und beim Nageltyp 2 mit 24,2mm von der Schraubenspitze entfernt. Die Werte lagen im Einzelnen beim Nageltyp 1 zwischen 20 und 27mm und beim Nageltyp 2 zwischen 19 und 32mm. Bei dem ebenfalls vom N. tibialis posterior abgehenden N. plantaris lateralis (Abb. 37) lagen die Entfernungen durchschnittlich beim Nageltyp 1 bei 28,7mm und beim Nageltyp 2 bei 29,8mm; die Einzelwerte befanden sich beim Nageltyp 1 zwischen 25 und 34mm und beim Nageltyp 2 zwischen 22 und 42mm. Die latero-mediale Verriegelung im Talus weist signifikant (p in Klammern) größere Abstände zu den Sehnen der Mm. fibularis longus (p = 0,015) und brevis (p = 0,009) für den Nageltyp 2 auf, wobei aber auch bei dem Nageltyp 1 diese Strukturen nicht geschädigt bzw. tangiert wurden.

Tabelle 3: Übersicht über Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen an der latero-medialen Verriegelung im Talus.

	Nageltyp 1					Nageltyp 2					
	x	nicht x	Abstand [mm]			x	nicht x	Abstand [mm]			
anatomische Strukturen	n	n	mean	SD	range	n	n	mean	SD	range	p
Latero-mediale Verriegelung Talus											
Retinacula mm. fibularium inf.	4	2	1	2,44	x – 6	4	2	1,7	4,08	x – 10	0,727/ 0,937
Tendo m. fibularis longi	0	6	7,5	2,58	3 – 10	0	6	17	5,13	5-23	0,015
Tendo m. fibularis brevis	0	6	4,3	2,58	t – 7	0	6	14,8	4,70	6-20	0,009
Tendo m. tibialis posterioris	0	6	3,2	1,72	t – 5	1	5	4,2	2,32	x – 7	0,773/ 0,240
Tendo m. flexoris digitorum longi	1	5	6	6,07	x – 16	0	6	10	4	6-16	0,227/ 0,310
Tendo m. flexoris hallucis longi	0	6	17,5	3,56	14-24	0	6	22,5	4,76	16-30	0,065
A. tibialis posterior	0	6	27	4,15	22-34	0	6	25,3	6,68	14-33	0,818
A. plantaris medialis	0	6	24,3	2,42	21-28	0	6	27,5	6,62	17-35	0,310
N. cutaneus dorsalis lateralis	0	6	20,5	4,92	13-25	0	6	25	8,36	10-34	0,180
N. cutaneus dorsalis intermedius	0	6	30,7	6,97	22-39	0	6	24,2	4,7	17-29	0,132
N. tibialis posterior	0	6	25,3	2,87	24-31	0	6	24	5,21	17-30	0,818
N. plantaris medialis	0	6	22,8	2,93	20-27	0	6	24,2	5	19-32	0,818
N. plantaris lateralis	0	6	28,7	3,67	25-34	0	6	29,8	7,65	22-42	0,937

(Bei zwei p Werten bezieht sich der 1. auf die Schädigung und der 2. auf den Abstand.)

n.....Anzahl
x.....geschädigt

p.....Signifikanz (**p < 0,05 rot**)
t.....tangiert, entspricht 0,00mm

5.1.4. Obere und untere Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes

Die Ergebnisse der Abstandsmessung von der Nagelspitze bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen bei der oberen und unteren Verriegelung im Bereich des distalen Tibiaschaftes sind in Tabelle 4 für die obere und in Tabelle 5 für die untere Verriegelung aufgeführt.

Die Messungen der Abstände, bzw. die Schädigungen wurden zum einem von der Schraubenspitze und zum anderen vom Schraubenkopf aus bestimmt, so dass relevante anatomische Strukturen der medialen und der lateralen Unterschenkelseite mit berücksichtigt wurden. Ebenfalls Einfluss auf den Grad der potentiellen Schädigung hat auch der Nageltyp, da beim Nageltyp 1 von lateral nach medial und beim Nageltyp 2 von medial nach lateral hier die Verriegelungsschrauben platziert wurden.

5.1.4.1. Ergebnisse der oberen Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes

Im Bereich des distalen Tibiaschaftes befinden sich drei für die Operation relevante Muskeln, diese sind der M. tibialis anterior, der M. extensor digitorum longus und der M. hallucis longus.

Bei der oberen Verriegelungsschraube wurde der M. tibialis anterior (Abb. 38 und 39) durch den Nageltyp 1 in 83,33% und beim Nageltyp 2 in 100% geschädigt. Der den M. tibialis anterior leicht verdeckende M. extensor digitorum longus (Abb. 38 und 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 100 % und durch den Nageltyp 2 nicht geschädigt. Beim Nageltyp 2 lag der durchschnittliche Abstand von der Schraubenspitze zum M. extensor digitorum longus bei 7,3mm; die Einzelwerte lagen zwischen 3 und 13mm. Der ebenfalls zum Teil durch den M. extensor digitorum verdeckte M. extensor hallucis longus (Abb. 38 und 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 100% und vom Nageltyp 2 in 33,33% geschädigt. Der durchschnittliche Abstand lag beim Nageltyp 2 bei 1,2mm; die Einzelwerte lagen zwischen zwei Schädigungen und 7mm Abstand.

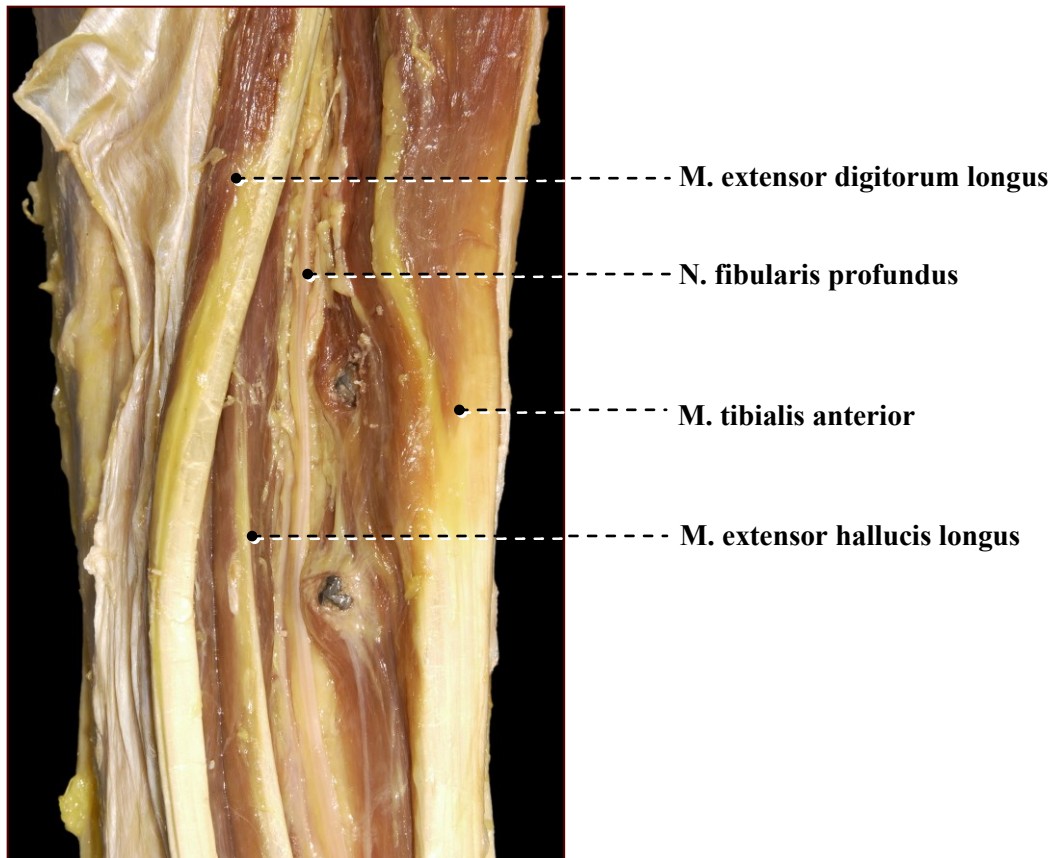


Abb. 38: Aufnahme der Regio cruralis lateralis mit den Schraubenspitzen bei Verwendung des Nageltyps 2 an einem rechten Fuß

Zu den relevanten anatomischen Gefäßen gehörten die A. tibialis anterior und die V. saphena magna.

Die A. tibialis anterior (Abb. 39), welche sich in Verriegelungshöhe nahe am lateralen Tibiaschaft befindet, wurde vom Nageltyp 1 in 50% und vom Nageltyp 2 nicht geschädigt. Beim Nageltyp 1 kam es neben den drei Schädigungen noch zu drei Abständen mit 0,00mm, beim Nageltyp 2 lag der durchschnittliche Abstand bei 5,3mm mit Einzelwerten zwischen 0,00 und 10mm. Die V. saphena magna (Abb. 41) wurde durch den Nageltyp 1 in keinem Fall und durch den Nageltyp 2 in 16,67% der Fälle geschädigt. Beim Nageltyp 1 lagen die durchschnittlichen Abstände bei 5,7mm und beim Nageltyp 2 bei 1mm. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 2 und 10mm und beim Nageltyp 2 zwischen einer Schädigung und 6mm.

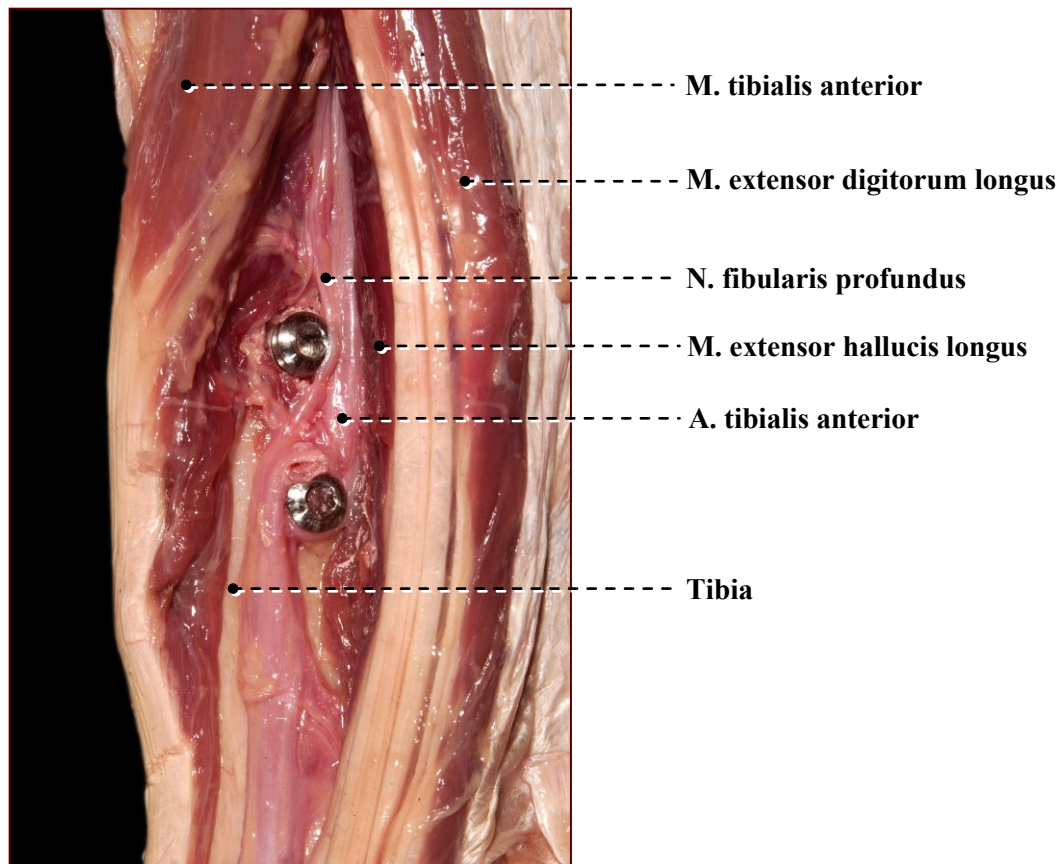


Abb. 39: Aufnahme der Regio cruralis lateralis mit den Schraubenköpfen bei Verwendung des Nageltyps 1 an einem linken Fuß

Bei den Nerven sind der die V saphena magna begleitende N. saphenus, der die A. tibialis begleitende N. fibularis profundus und der medial gelegene, und auf Verriegelungshöhe die Fascia cruris durchbrechende N. fibularis superficialis betrachtet worden.

Der N. saphenus (Abb. 41) lag beim Nageltyp 1 durchschnittlich mit 5,3mm entfernt und beim Nageltyp 2 mit 1,8mm. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 2 und 13mm und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00 und 5mm. Der N. fibularis profundus (Abb. 38 und 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 33,33% und durch den Nageltyp 2 in 16,67% geschädigt. Die durchschnittlichen Entfernungen lagen beim Nageltyp 1 bei 0,7mm und beim Nageltyp 2 bei 4,2mm; die entsprechenden Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen zwei Schädigungen und 4mm und beim Nageltyp 2 zwischen einer Schädigung und 9mm. Der N. fibularis superficialis (Abb. 40) wurde durch den Nageltyp 1 in 33,33% und durch den Nageltyp 2 in keinem Fall

geschädigt. Die durchschnittlichen Entfernungen lagen beim Nageltyp 1 bei 5,3mm und beim Nageltyp 2 bei 19,8mm. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen zwei Schädigungen und 18mm und beim Nageltyp 2 zwischen 13 und 28mm.

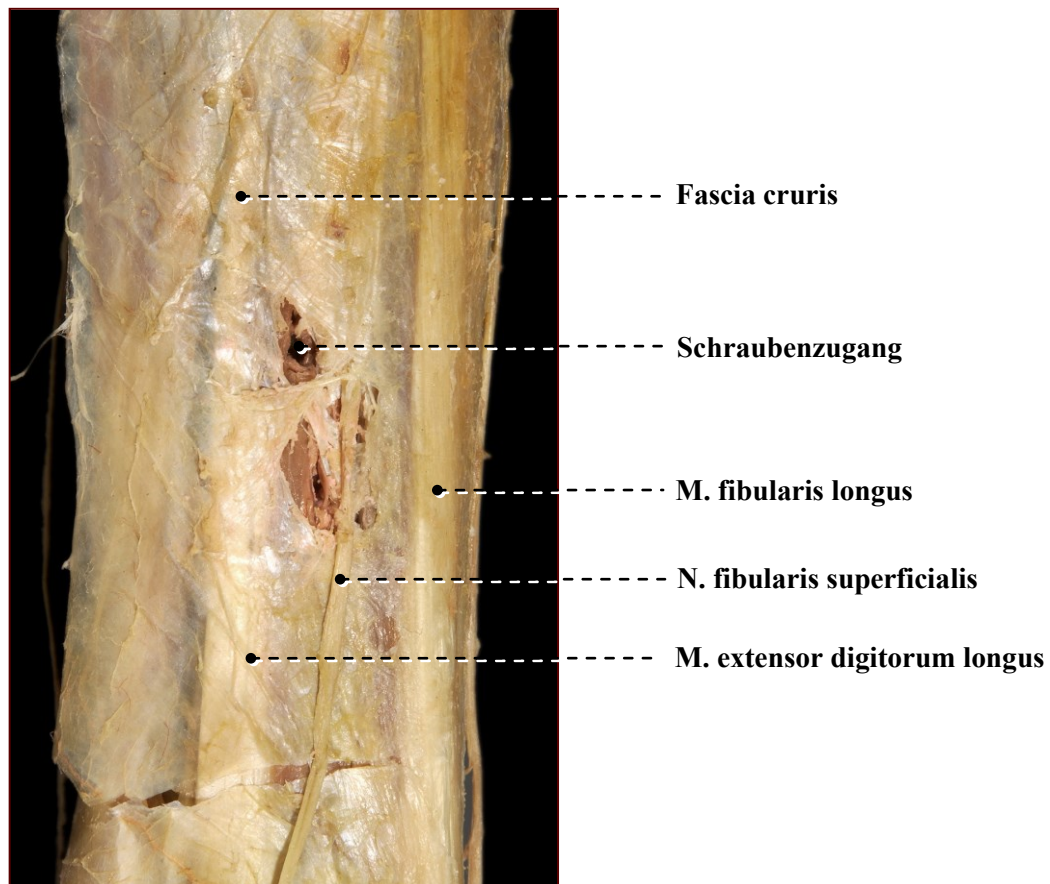


Abb. 40: Aufnahme der Regio cruralis lateralis mit den Schraubenzugängen bei Verwendung des Nageltyps 1 an einem linken Fuß

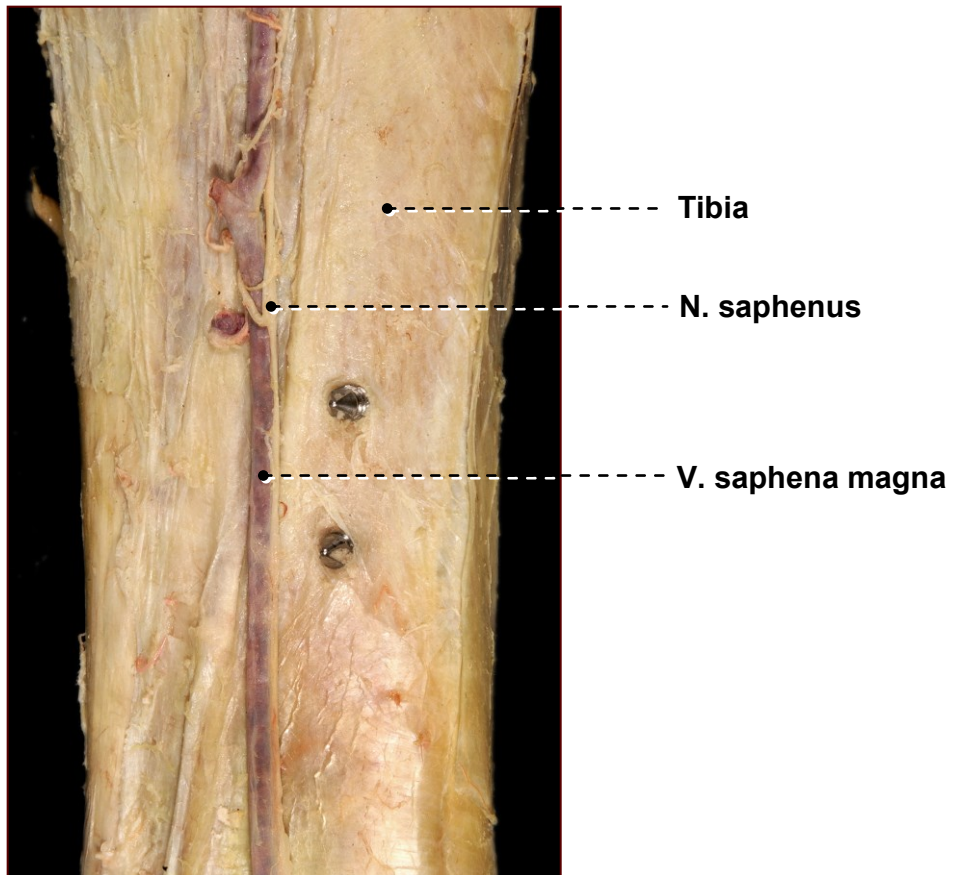


Abb. 41: Aufnahme der Regio cruralis medialis mit den Schraubenspitzen bei Verwendung eines Nageltyps 1 an einem linken Fuß

Tabelle 4: Übersicht über Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen an der oberen Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes.

	Nageltyp 1					Nageltyp 2					
	x	nicht x	Abstand [mm]			x	nicht x	Abstand [mm]			
anatomische Strukturen	n	n	mean	SD	range	n	n	mean	SD	range	p
Obere Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes											
M. tibialis anterior	5	1	-	-	x – t	6	0	-	-	x	0,500 / 1,0
M. extensor digitorum longus	6	0	-	-	x	0	6	7,3	3,26	3 – 13	0,001/ 0,002
M. extensor hallucis longus	6	0	-	-	x	2	4	1,2	2,85	x – 7	0,030/ 0,699
A. tibialis anterior	3	3	x	-	x – t	0	6	5,3	3,32	t – 10	0,091/ 0,015
V. saphena magna	0	6	5,7	3,26	2 – 10	1	5	1,0	2,44	x – 6	0,500/ 0,015
N. saphenus	0	6	5,3	4,13	2 – 13	0	6	1,8	2,48	t – 5	0,132
N. fibularis profundus	2	4	0,7	1,63	x – 4	1	5	4,2	2,93	x – 9	0,500/ 0,041
N. fibularis superficialis	2	4	5,3	7,03	x – 18	0	6	19,8	5,45	13 – 28	0,227/ 0,009

(Bei zwei p Werten bezieht sich der 1. auf die Schädigung und der 2. auf den Abstand.)

n.....Anzahl
x.....geschädigt

p.....Signifikanz (**p < 0,05 rot**)
t.....tangiert, entspricht 0,00mm

5.1.4.2. Ergebnisse der unteren Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes

Bei der unteren Verriegelungsschraube wurde der M. tibialis anterior (Abb. 38 und 39) durch den Nageltyp 1 in 66,67% und beim Nageltyp 2 in 100% geschädigt. Die Durchschnittsentfernung lag beim Nageltyp 1 bei 0,7mm mit Einzelwerten zwischen vier Schädigungen und 4mm Abstand. Der M. extensor digitorum longus (Abb. 38 und 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 100%, durch den Nageltyp 2 jedoch in keinem Fall geschädigt. Beim Nageltyp 2 lag der durchschnittliche Abstand von der Schraubenspitze bei 5,3mm; die Einzelwerte lagen zwischen 2 und 7mm. Der M. extensor hallucis longus (Abb. 38 und 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 100% und vom Nageltyp 2 zu 50% geschädigt. Der durchschnittliche Abstand lag beim Nageltyp 2 zwischen drei Schädigungen und drei Abständen mit 0,00mm.

Die A. tibialis anterior (Abb. 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 83,33% und durch den Nageltyp 2 in 16,67% geschädigt. Beim Nageltyp 1 kam es neben den fünf Schädigungen noch zu einem Abstand mit 0,00mm; beim Nageltyp 2 lagen der durchschnittliche Abstand bei 3,8mm sowie die Einzelwerte zwischen einer Schädigung und 6mm. Die V. saphena magna (Abb. 41) wurde durch den Nageltyp 1 nicht und durch den Nageltyp 2 in 16,67% geschädigt. Beim Nageltyp 1 lagen die durchschnittlichen Abstände bei 4,7mm und beim Nageltyp 2 bei 1,7mm. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 2 und 8mm und beim Nageltyp 2 zwischen einer Schädigung und 5mm Abstand.

Der N. saphenus (Abb. 41) lag beim Nageltyp 1 durchschnittlich mit 4,3mm und beim Nageltyp 2 mit 2,5mm entfernt. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 1 und 10mm und beim Nageltyp 2 zwischen 0,00mm und 7mm. Der N. fibularis profundus (Abb. 38 und 39) wurde durch den Nageltyp 1 in 66,67% und durch den Nageltyp 2 nicht geschädigt. Die durchschnittlichen Entfernungen lagen beim Nageltyp 1 bei 1mm und beim Nageltyp 2 bei 2,8mm. Die entsprechenden Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen vier Schädigungen und 6mm Abstand und beim Nageltyp 2 zwischen 1 und 9mm. Der N. fibularis superficialis (Abb. 40) wurde durch den Nageltyp 1 in 66,67% und durch den Nageltyp 2 nicht geschädigt. Die durchschnittlichen Entfernungen lagen beim Nageltyp 1 bei 4,5mm und beim Nageltyp 2 bei 17,5mm. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen vier Schädigungen und 19mm und beim Nageltyp 2 zwischen 11 und 27mm.

Tabelle 5: Übersicht über Abstandsmessung bzw. Überprüfung auf Schädigung der relevanten anatomischen Strukturen an der unteren Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes.

	Nageltyp 1					Nageltyp 2					
	x	nicht x	Abstand [mm]			x	nicht x	Abstand [mm]			
anatomische Strukturen	n	n	mean	SD	range	n	n	mean	SD	range	p
untere Verriegelung an der Nagelspitze im Bereich des distalen Tibiaschaftes											
M. tibialis anterior	4	2	0,7	1,63	x – 4	6	0	-	-	x	0,227/ 0,699
M. extensor digitorum longus	6	0	-	-	x	0	6	5,3	1,86	2 – 7	0,001/ 0,002
M. extensor hallucis longus	6	0	-	-	x	3	3	-	-	x – t	0,091 / 1,0
A. tibialis anterior	5	1	-	-	x – t	1	5	3,8	2,13	x – 6	0,040/ 0,015
V. saphena magna	0	6	4,7	2,33	2 – 8	1	5	1,7	2,06	x – 5	0,500/ 0,065
N. saphenus	0	6	4,3	3,26	1 – 10	0	6	2,5	2,66	t – 7	0,310
N. fibularis profundus	4	2	1,0	2,44	x – 6	0	6	2,8	1,32	1 – 4	0,030/ 0,065
N. fibularis superficialis	4	2	4,5	7,79	x – 19	0	6	17,5	5,61	11 – 21	0,030/ 0,026

(Bei zwei p Werten bezieht sich der 1. auf die Schädigung und der 2. auf den Abstand.)

n.....Anzahl

x.....geschädigt

p.....Signifikanz (**p < 0,05 rot**)

t.....tangiert, entspricht 0,00mm

Im Bereich des distalen Tibiaschaftes sind unabhängig vom Verriegelungsvorgang von medial (Nageltyp 2) bzw. lateral (Nageltyp 1) Anteile des M. tibialis anterior und des M. extensor hallucis longus potentiell gefährdet. Statistisch signifikante Vorteile ergeben sich in der Region der oberen Verriegelungsschraube für den Nageltyp 2 bezüglich des M. extensor digitorum longus, des M. extensor hallucis longus, der A. tibialis anterior, des N. fibularis profundus und des N. fibularis superficialis. In der Region der unteren Verriegelungsschraube ergaben sich signifikante Unterschiede für den Nageltyp 2 bezüglich des M. extensor digitorum longus, der A. tibialis anterior, des N. fibularis profundus und des N. fibularis superficialis. Der Nageltyp 1 erzielt signifikant bessere Ergebnisse in Bezug auf die V. saphena magna für die obere Verriegelungsschraube.

5.1.5. Postero-anteriore Verriegelungsschraube Calcaneus

Bei der postero-anterioren Verriegelungsschraube des Calcaneus kam es auf eine möglichst zentrale Lage der Verriegelungsschraube an, welche gleichzeitig eine gute Rotation anzeigt. Um dies zu bestimmen, wurde die Achillessehnenansatzbreite und die Schraubenmitte von lateral bestimmt; diese Werte sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Achillessehnenbreite zeigen für den Nageltyp 1 einen durchschnittlichen Wert von 27,5mm und für den Nageltyp 2 von 28,3mm. Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 24 und 31mm und für den Nageltyp 2 zwischen 22 und 32mm. Hier sind anatomisch bedingt keine großen Unterschiede zu erwarten. Bei der Bestimmung der Schraubenmitte von lateral lagen die Durchschnittswerte beim Nageltyp 1 bei 14,3mm und beim Nageltyp 2 bei 17,5mm (Abb. 42 und 43). Die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 6 und 30mm und beim Nageltyp 2 zwischen 7 und 30mm. Für die postero-anteriore Verriegelungsschraube des Calcaneus ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

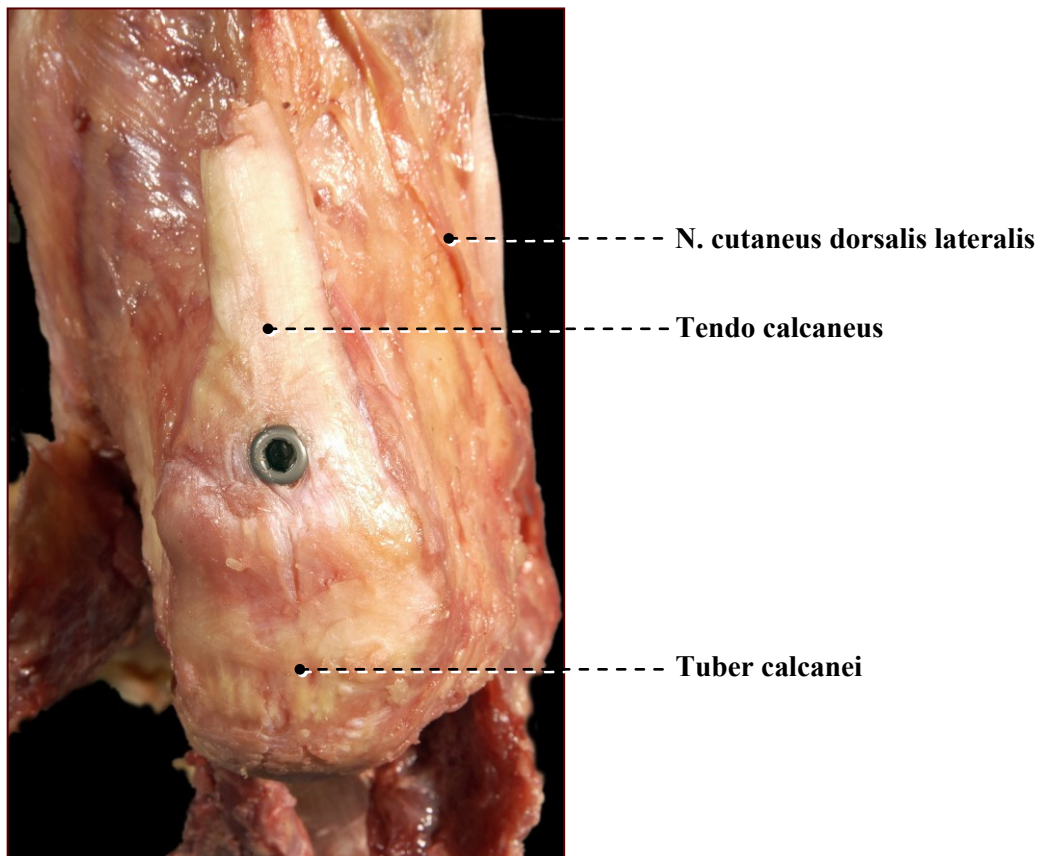


Abb. 42: Aufnahme des Achillessehnenansatzes mit Darstellung des Schraubenkopfes einer postero-anterioren Verriegelungsschraube bei dem Nageltyp 2 an einem rechten Fuß

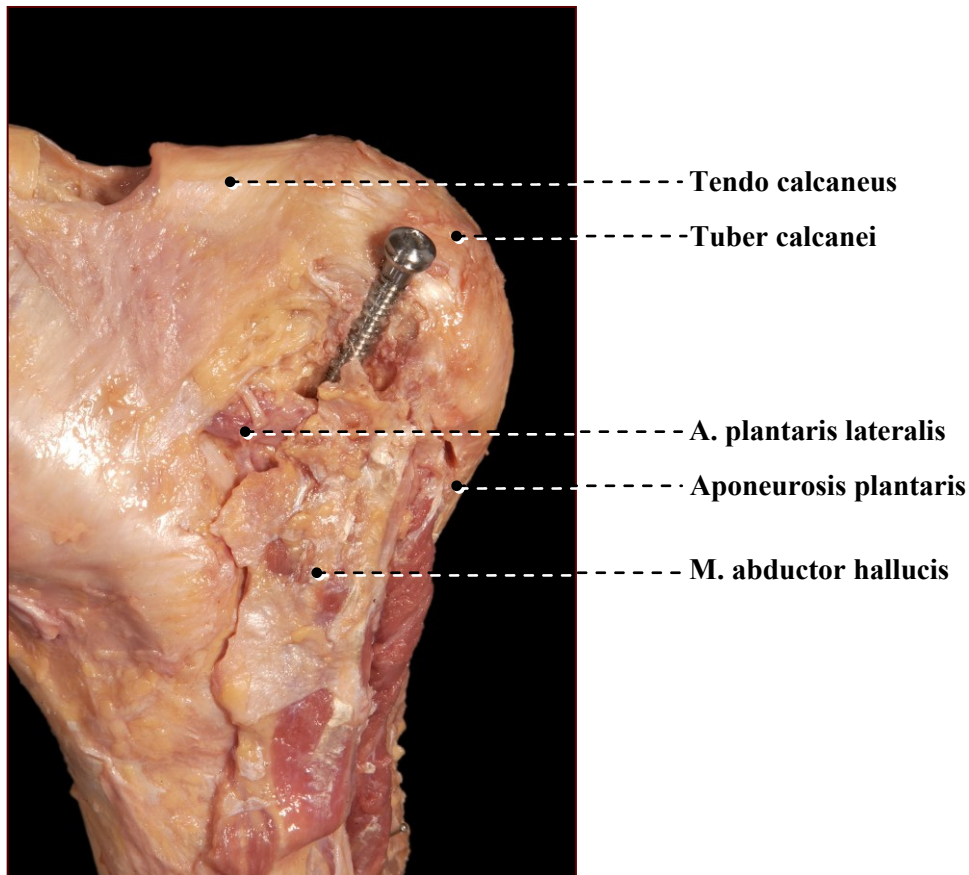


Abb. 43: Aufnahme der medialen Fußseite mit postero-anteriorer Verriegelungsschraube bei dem Nageltyp 1 an einem rechten Fuß

Tabelle 6: Übersicht über Abstandsmessung der relevanten anatomischen Strukturen an der postero-anterioren Verriegelung im Calcaneus.

	Nageltyp 1					Nageltyp 2					
	x	nicht x	Abstand [mm]			x	nicht x	Abstand [mm]			
anatomische Strukturen	n	n	mean	SD	range	n	n	mean	SD	range	p
postero-anteriore Verriegelungsschraube Calcaneus											
Achilles- sehnen- ansatzbreite	-	-	27,5	2,88	24 – 31	-	-	28,3	3,77	22 – 32	0,485
Schrauben- mitte von lateral	-	-	14,3	8,80	6 – 30	-	-	17,5	6,71	7 – 26	0,310

n.....Anzahl

x.....geschädigt

p.....Signifikanz ($p < 0,05$ rot)

5.2. Radiologische Ergebnisse

5.2.1. Achsenvermessung

Bei der Achsenvermessung wurden die präoperative und die postoperative Rückfußachse bestimmt, welche in Tabelle 7 aufgeführt sind.

Tabelle 7: Übersicht der prä- und postoperativ bestimmten Rückfußachsen.

	Nageltyp 1			Nageltyp 2			
	mean [°]	SD [°]	range [°]	mean [°]	SD [°]	range [°]	Signifikanz
präoperative Rückfußachse	8	2,0	5 – 10	7,3	4,3	0 – 12	Nein
postoperative Rückfußachse	7,3	0,82	6 – 8	8,2	2,99	6 – 14	Nein

Die Ergebnisse lagen bei der präoperativen Rückfußachse beim Nageltyp 1 im Durchschnitt bei 8° und beim Nageltyp 2 bei 7,3°; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 5 und 10° und beim Nageltyp 2 zwischen 0 und 12°. Bei der postoperativen Rückfußachse lagen die durchschnittlichen Werte beim Nageltyp 1 bei 7,3° und beim Nageltyp 2 bei 8,2°; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 6 und 8° und beim Nageltyp 2 zwischen 6 und 14°.

Die Auswertung der radiologischen Daten zeigte keine signifikanten Veränderungen in den Rückfußachsen vor und nach Implantation der Verriegelungsnägel, wobei auch zwischen den beiden Nägeln keine signifikanten Unterschiede nachzuweisen waren. Ebenso wurde keine relevante Varisierung der Rückfußachse gesehen.

5.2.2. Ossäre Führung im Calcaneus

Bei der ossären Führung im Calcaneus wurden die Volumina der Nägel bestimmt, welche in den Calcanei platziert wurden; diese sind in Tabelle 8 aufgeführt. Die Größe der Volumina der Nägel ermöglicht eine Aussage über die Stabilität der Osteosynthese.

Tabelle 8: Übersicht der volumenbasierten Vermessungen der ossären Führung im Calcaneus.

	Nageltyp 1			Nageltyp 2			
	mean [cm ³]	SD [cm ³]	range [cm ³]	mean [cm ³]	SD [cm ³]	range [cm ³]	Signifikanz
ossäre Führung im Calcaneus	3,21	0,46	2,62 - 3,95	3,67	0,96	2,86 - 5,16	Nein

Bei der ossären Führung im Calcaneus wurden im Durchschnitt beim Nageltyp 1 3,21cm³ und beim Nageltyp 2 3,67cm³ erreicht; die Einzelwerte lagen beim Nageltyp 1 zwischen 2,62 und 3,95cm³ und beim Nageltyp 2 zwischen 2,86 und 5,16cm³.

Hinsichtlich der ossären Führung im Calcaneus ließen sich in der volumenbasierten Vermessung keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Nageltypen ermitteln. Die Mittelwerte lagen bei 3,00cm³ für den Nageltyp 1 und bei 3,50cm³ für den Nageltyp 2.

6. Diskussion

Die intramedullären Verfahren zur retrograden tibiototalcalcanearen Fusion (TTCF) erfreuen sich zunehmender Beliebtheit bei schweren Rückfußdeformitäten, bei fehlgeschlagenen Sprunggelenksfusionen sowie kombinierten tibiotalaren und subtalaren arthrotischen Veränderungen (Moore et al. 1995, Mann et al. 2001, Chiodo et al. 2003, Hammett et al. 2005, Noonan et al. 2005, Mückley et al. 2006, Jerosch und Heisel 2009). Vorteile sind die mögliche minimal-invasive perkutane Implantationstechnik und die hohe biomechanische Steifigkeit der Nagelosteosynthesen (Mann et al. 2001, Chiodo et al. 2003, Mückley et al. 2006).

Pochatko et al. analysierten 1995 die anatomisch gefährdeten Strukturen im Bereich der Fußsohle für die TTCF mit retrogradem Marknagel. Pochatko et al. gab 6 Zonen an, welche den Abstand der Nagelaußenseite zu den gefährdeten anatomischen Strukturen definierten (Pochatko et al. 1995). Die beschriebenen gefährdeten anatomischen Strukturen stimmen mit den Ergebnissen dieser Studie überein. Im Gegensatz zu Pochatko et al. definierten wir keine Zonen, sondern bestimmten den kürzesten Abstand der gefährdeten anatomischen Struktur zum Nagel bzw. zur Schraube. Aus klinischer Sicht sollte vor und nach Implantation eines Nagels eine neurovaskuläre und muskulär-funktionale Untersuchung erfolgen, um Deformitäten und gefährdete anatomische Strukturen zu erkennen.

Die Aponeurosis plantaris und die Mm. flexor digitorum brevis, quadratus plantae, abductor digiti minimi sind obligat gefährdete Strukturen im Bereich der Nageleinbringstelle. Zwischen den beiden untersuchten Nageltypen ergaben sich hinsichtlich des Gefährdungspotentials keine relevanten Unterschiede. Die möglichen Komplikationen wie Fibrosierung und Kontraktur dieser Strukturen mit Krallen- bzw. Hammerzehenausbildung und sekundärer Aufrichtungsdeformität der Großzehe wurden von Pochatko et al. beschrieben (Pochatko et al. 1995). Hier sei nochmals auf die prä- und postoperative Untersuchung zur Bestimmung von besonders gefährdeten anatomischen Strukturen hingewiesen.

Auch der geringe Abstand des geraden Marknageltyps zur A. plantaris lateralis und zum N. plantaris lateralis stimmt in den Arbeiten überein. In dieser Studie kam es in keinem Fall zu einer Schädigung der A. plantaris lateralis oder des N. plantaris lateralis. Der gemessene mittlere Abstand betrug 2,3mm bzw. 5,2mm und ist mit der von Pochatko et al. angegebenen Zone II

vergleichbar. Zone II definierte Pochatko et al. als eine Entfernung kleiner als 5mm bis zur Nagelaußenseite. Für den N. plantaris lateralis zeigte sich sogar ein signifikanter Unterschied zum gebogenen Nageltyp, bei dem der gemessene mittlere Abstand 9mm betrug. Ebenfalls ein signifikanter Unterschied zeigte sich für die Sehne des M. hallucis longus hinsichtlich des gebogenen Nageltyps im Bereich der Nageleintrittsstelle.

Entgegen den Angaben von Flock et al. konnte in dieser Studie eine Schädigung des Ramus primus n. plantaris lateralis nicht nachweisen werden (Flock et al. 1997); dies stimmt auch mit den Ergebnissen von Pochatko et al. und Stephenson et al. überein (Pochatko et al. 1995, Stephenson et al. 1996). Die Ergebnisse zeigten im Seitenvergleich deutlich, dass mit einem gebogenen Marknageldesign der Abstand zu den relevanten neurovaskulären Strukturen im Bereich der Fußsohle vergrößert werden kann. Dies ist nachvollziehbar, da die Eintrittsstelle des gebogenen Nageltyps lateraler liegt als die eines geraden Nageltyps. Es traten in der Studie jedoch auch für den geraden Nageltyp keine direkten Schädigungen an den neurovaskulären Strukturen der Fußsohle auf. Insofern unterstützen die Daten nicht die prinzipielle Notwendigkeit zur Resektion des Innenknöchels und Medialisierung von Calcaneus und Talus gegenüber dem Tibiaschaft zur Schonung der A. plantaris lateralis und des N. plantaris lateralis, wie von McGarvey et al. empfohlen (McGarvey et al. 1998).

Welche klinische Bedeutung die gefährdeten anatomischen Strukturen im Bereich der Fußsohle haben, lässt sich im Rahmen dieser Studie nicht abschließend klären. In klinischen Studien sind Komplikationen durch Verletzung oben genannter Strukturen im Bereich der Fußsohle bisher überwiegend nicht aufgeführt (Moore et al. 1995, Quill 1996, Hammet et al. 2005). Stephenson et al. berichteten 1996 über 1 von 22 Patienten mit verminderter Sensibilität im Innervationsgebiet des N. plantaris lateralis und über 3 von 22 Patienten im Innervationsgebiet der Rami calcanei mediales n. tibialis (Stephenson et al. 1996). Millett et al. beschreibt in seiner retrospektiven Übersicht an 15 Patienten einen Fall einer Läsion des N. plantaris lateralis. Wie von ihm auch empfohlen sollte zum Schutz dieser gefährdeten anatomischen Strukturen und zur Vermeidung der oben genannten Probleme eine sorgfältige Präparation der Nageleintrittsstelle erfolgen. Hierzu sollten mit einer nicht zu klein gewählten Inzision die Weichteilstrukturen mit Haken oder einer Bohrhülse während des Aufbohr- und Implantationsvorganges geschützt werden. Weiterhin ist eine Platzierung des Nagels unterhalb der Knochenoberfläche zu empfehlen (Millett et al. 2002).

Die Verriegelungsschrauben im Talus und Calcaneus sind entsprechend biomechanischer Überlegungen in beiden Nageltypen platziert und führen zu keinen relevanten anatomischen Unterschieden. Dies ist nahe liegend, da die Verriegelungsmöglichkeiten beider Nageltypen vergleichbar angeordnet sind und die Ausrichtung des Nagels im Rückfuß einen zentralen Operationsschritt darstellt, der unter Bildwandlerkontrolle vorgenommen wird, und insofern nur mit geringer Streuung verbunden ist.

Die Schraubenspitze der latero-medialen Verriegelungsschraube im Calcaneus konnte in unserer Serie zuverlässig im Sustentaculum tali platziert werden, jedoch traten auch hier Verletzungen gefährdeter Strukturen - Sehne des M. flexor hallucis longus und des M. flexor digitorum longus - auf. Die Sehne des M. flexor hallucis longus wurde durch den geraden Nageltyp nicht, jedoch durch den gebogenen Nageltyp dreimal geschädigt. Weiterhin wurde die Sehne des M. flexor digitorum longus durch den geraden Nageltyp zweimal und durch den gebogenen Nageltyp einmal geschädigt.

Für den N. plantaris medialis zeigte sich ein signifikanter Unterschied mit einem größeren Abstand von der Schraubenspitze für den geraden Nageltyp von 9,8mm gegenüber dem gebogenen Nageltyp von 4,7mm. Die A. plantaris medialis weist mittlere Abstände von 11,8mm beim geraden Nageltyp bzw. 7,3mm beim gebogenen Nageltyp auf, welche damit ebenfalls eine potentielle Gefährdung beim Platzieren der Calcaneus-Verriegelungsschraube bedeutet. Ein Überstand der Schraubenspitze bzw. ein zu tiefes Einführen des Bohrers nach medial sollte deshalb unbedingt vermieden werden, um diese Strukturen nicht zu gefährden.

Am Schraubenkopf der Calcaneus-Verriegelungsschraube zeigten sich teilweise signifikante Unterschiede für die Sehne des M. fibularis brevis mit 4 Schädigungen durch den geraden Nageltyp und keiner Schädigung durch den gebogenen Nageltyp. Es sollten deshalb bei der Resektion des Außenknöchels und beim Einbringen der Calcaneus-Verriegelungsschraube, wie auch bei der Verriegelung im Talus, die Sehnen obligat durch Haken weggehalten und geschont werden.

Die Schraubenspitze der Verriegelungsschraube im Talus kommt in Höhe bzw. leicht proximal der Innenknöchelspitze zu liegen. Sie sollte nicht zu lang gewählt werden, um den Kompressionsvorgang der Gelenkflächen nicht zu blockieren. Die Verriegelungsschraube am

Talus schädigte in unserer Studie einmal die Sehne des M. tibialis posterior beim gebogenen Nageltyp und einmal die Sehne des M. flexorum digitorum longus beim geraden Nageltyp. Ein mittlerer Abstand von 3,2mm beim geraden Nageltyp bzw. 4,2mm beim gebogenen Nageltyp zur Sehne des M. tibialis posterior und ein mittlerer Abstand von 6mm beim geraden Nageltyp bzw. 10mm beim gebogenen Nageltyp zur Sehne des M. flexorum digitorum longus zeigte, dass ein vorsichtiges Durchbohren der medialen Kortikales des Talus erfolgen sollte.

Der signifikant kleinere Abstand des Schraubenkopfes der Talus-Verriegelungsschraube zu den Sehnen des M. fibularis longus et brevis für den geraden Nageltyp dürfte klinisch keine Auswirkung haben, da bei einem lateralen Zugang mit Resektion des Außenknöchels, wie in dieser Studie durchgeführt, diese Sehnen obligat mit einem Haken weggehalten und geschützt werden.

Über gefährdete Strukturen im Bereich der Verriegelung an der Nagelspitze liegen bisher keine publizierten Ergebnisse vor. Entsprechend der Ergebnisse dieser Studie sind der M. tibialis anterior, der M. extensor digitorum longus und der M. extensor hallucis longus im Bereich des Zuganges bei Verriegelungsvorgängen von lateral gefährdet und sollten deshalb inzidiert und gespreizt werden. Aber auch beim Verriegelungsvorgang von medial kann es durch die Bohrspitze, das Längenmessgerät oder die überstehende scharfe Schraubenspitze bei selbstschneidenden Schrauben zu Schäden im Bereich des M. tibialis anterior und des M. extensor hallucis longus kommen. Diese Schädigungen sind ausnahmslos umschrieben und dürften keine relevante Auswirkung auf die Gesamtfunktion der Muskeln haben.

In dieser Studie zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede bezüglich der Gefährdung der A. tibialis anterior, des N. fibularis profundus und des N. fibularis superficialis mit signifikanten Schädigungen und Abständen hinsichtlich des entsprechenden Nageltyps.

Für die A. tibialis anterior ergab sich, die Ergebnisse der oberen und unteren Verriegelungsschraube am distalen Unterschenkel zusammengefasst, eine signifikante Schädigung durch den geraden Nageltyp bei einer Verriegelung von lateral nach medial. Dahingehend zeigte die Verwendung des gebogenen Nageltyps mit einer Verriegelung von medial nach lateral eine signifikant geringere Schädigung.

Beim N. fibularis profundus zeigte sich eine Schädigung beim geraden Nageltyp in sechs von zwölf Verriegelungen am distalen Unterschenkel, und beim gebogenen Nageltyp in einer von zwölf. Hinsichtlich des N. fibularis superficialis zeigte sich in dieser Studie durch den geraden

Nageltyp eine Schädigung in sechs von zwölf Verriegelungen, und für den gebogenen Nageltyp keine Schädigung. Dies ist nachvollziehbar, da bei einem lateralen Zugang und lateralen Arbeitsportal die umliegenden Strukturen durch unter anderem Bohrerhülsen, Bohrer und Schrauben direkt gefährdet sind. Bei Analyse der publizierten klinischen Ergebnisse der TTCTF mit retrograden Marknägeln ergeben sich keine Hinweise, dass Ausfälle der oben beschriebenen Strukturen bisher postoperativ auffällig geworden sind (Kile et al. 1994, Moore et al. 1995, Quill 1999, Millett et al. 2002, Goebel et al. 2006). Dies kann bedeuten, dass falls Schädigungen auftreten, überwiegend partielle Schäden auftreten oder entsprechende Schäden klinisch inapparent verlaufen. Letzter Aspekt könnte durch die in der klinischen Praxis häufig gleichzeitig vorliegende periphere Neuropathie, Multimorbidität und/oder diabetische Angiopathie begünstigt sein. Die beschriebenen Schäden durch den Verriegelungsvorgang an der Nagelspitze heben die Bedeutung des gründlichen chirurgischen Vorgehens mit ausreichender Hautinzision, gründlicher Weichteildissektion, Verwenden von Gewebeschutzhülsen, exakte Längenbestimmung der Schrauben und Vermeiden überstehender Schraubenspitzen hervor. Verwendet man den gebogenen Nageltyp, der im Bereich der Nagelspitze eine Verriegelung von medial nach lateral vorsieht, drohen häufiger Schäden an der V. saphena magna. Diese können ebenfalls, wie oben beschrieben, durch die intraoperativen Schutzmaßnahmen vermieden werden.

Kommen kurze retrograde Nägel bei der TTCTF zur Anwendung, die typischerweise eine Länge von 150 bis 180mm haben, ist die Verriegelung im distalen Tibiaschaftbereich mit der klassischen distalen Verriegelung bei der antegraden Tibiamarknagelung vergleichbar. Nach Kenntnis des Autors liegt lediglich eine anatomische Studie zu diesem Thema von Roberts et al. vor. Sie verglichen bei der antegraden Tibiamarknagelung die distale Verriegelung von medial mit der von lateral und fanden keine signifikanten Unterschiede und keine direkte Schädigungen für das Gefäßnervenbündel der anterioren Schienbeinstraße und der V. saphena magna. Übereinstimmend mit den vorliegenden Ergebnissen kann dennoch prinzipiell der geringe Abstand der Verriegelungsschrauben von der anterioren Schienbeinstraße und der V. saphena magna und darüber hinaus die potentielle Gefährdung dieser Strukturen bestätigt werden (Roberts et al. 1999).

Die Lage der A. tibialis anterior zur distalen Verriegelungsschraube bei der Tibiamarknagelung ist angesichts berichteter iatrogenen Verletzungen besorgniserregend (Williamson und Kershaw 1989, Urban und Tornetta 1995). So beschreiben Urban et al. einen Fall, in dem es zur Ausbildung einer Ischämie des Fußes kam, als eine zu lang gewählte Verriegelungsschraube

gegen die A. tibialis anterior drückte. Er weist darauf hin, dass eine korrekte Rotation des Nagels, nicht zu lange Schrauben, nicht zu kurze Nägel sowie eine vorsichtige intraoperative Präparation die Verletzung der A. tibialis anterior deutlich verringert.

Auch in einer Fallbeschreibung von Williamson et al. führte die Kompression eines Gefäßes am Unterschenkel durch die Verriegelungsschraube eines intramedullären Nagels zur Ischämie mit anschließend notwendigem Gefäßersatz.

Für den N. fibularis superficialis und das posteriore Tibiagefäßnervenbündel wurden signifikant größere Abstände für die Verriegelung von lateral von Roberts et al. angegeben, wobei der Abstand zum posterioren Tibiagefäßnervenbündel im Mittel bei mindestens 2cm lag und somit keine relevante Gefährdung bedeutete (Roberts et al. 1999). Daher wurde auch die posteriore Schienbeinstrasse in dieser Studie auf Höhe der oberen und unteren Verriegelungsschraube am distalen Unterschenkel nicht mit betrachtet.

Die große Variabilität des anatomischen Verlaufs des N. fibularis superficialis wurde von Adkinson et al. und Blair et al. beschrieben und erschwert die Interpretation der diesbezüglichen Ergebnisse von Roberts et al., wobei für uns nicht nachvollziehbar ist, wie bei gleicher Rotation des Marknagels, gleicher Lage der Verriegelungslöcher und korrekter Schraubenlänge ein größerer Abstand des N. fibularis superficialis zum Schraubenkopf bei Verriegelung von lateral verglichen zum Abstand zur Schraubenspitze bei Verriegelung von medial auftreten kann (Adkison et al. 1991, Blair und Botte 1994, Roberts et al. 1999).

Grundsätzlich ist die Knochenführung des retrograden Marknagels zur TTCF im Calcaneus nicht unproblematisch, besonders bei kleinen anatomischen Abmessungen und schlechter Knochenqualität. Diese Problematik kann auch durch eine 5°-Valgusbiegung des Nagels nicht signifikant verbessert werden. So zeigte sich durchschnittlich eine Knochenführung im Calcaneus beim geraden Nageltyp von 3,21cm³ und beim gebogenen Nageltyp von 3,67cm³. Wie die radiologische Auswertung jedoch klar zeigte, spricht das bestimmte durchschnittliche Volumen des knöchernen Kanals im Calcaneus und die korrekte Rückfußausrichtung bei durchgeführter in-situ Arthrodeese nicht für eine routinemäßig notwendige Medialisierung des Calcaneus. Des Weiteren wurde für beide Nageldesigns bei korrekter Operationstechnik keine relevante Varisierung der Rückfußachse im Vergleich der prä- und postoperativen Messergebnisse gesehen.

Die Ergebnisse einschränkend muss angefügt werden, dass in dieser Studie keine hochgradigen Rückfußdeformitäten vorlagen, bei denen es zu Abweichungen von der „Standard“-Anatomie kommen konnte. Dennoch ist es wichtig und hilfreich, Kenntnisse über die grundsätzlich gefährdeten Strukturen bei der TTCF mit retrogradem Marknagel zu haben. Die vorhandenen Ergebnisse zeigten, dass mit einem gebogenen Marknageldesign der Abstand zu den relevanten neurovaskulären Strukturen im Bereich der Fußsohle vergrößert werden kann. Die Verriegelung im Bereich der Nagelspitze von medial ausgeführt ist sicherer, was eine mögliche Verletzung des N. fibularis superficialis, des N. fibularis profundus und der A. tibialis anterior verringert. Zwischen geradem und gebogenem Marknageldesign bestehen keine signifikanten Unterschiede des Knochenkanals des Marknagels im Calcaneus und der resultierenden Rückfußachse. Um klinische Empfehlungen zu geben, sind weitere prospektive klinische Studien zur Datensammlung notwendig. Nichtsdestotrotz lassen die vorliegenden Daten darauf schließen, dass ein etwas mehr lateraler Eintrittspunkt an der plantaren Seite des Calcaneus und eine medial zu lateral verlaufende Verriegelung an der Nagelspitze sich klinisch als sinnvoll erweisen können, da ein größerer Abstand von den angrenzenden neurovaskulären Strukturen entsteht und deshalb eine größere Sicherheitsspanne.

7. Schlussfolgerungen

Zur tibiototalcalcanearen Fusion (TTCF) durch eine retrograde Marknagelung wurden zwei Nägel verglichen, welche sich im Design unterschieden. Es konnte gezeigt werden, dass durch einen gebogenen Marknagel der Abstand zu den relevanten neurovaskulären Strukturen im Bereich der Fußsohle vergrößert werden kann. So zeigte die Auswertung der Daten im Bereich der Nageleinbringstelle signifikant größere Abstände des gebogenen Nageltyps von der Sehne des M. flexor hallucis longus, der A. plantaris medialis und dem N. plantaris lateralis. Für die Verriegelungsschrauben im Calcaneus ergaben sich signifikante Vorteile für den gebogenen Nageltyp hinsichtlich der Schädigung der Sehne des M. fibularis brevis und des größeren Abstandes des N. plantaris medialis zum geraden Nageltyp. Die Verriegelung im Talus weist signifikant größere Abstände der Sehnen des M. fibularis longus et brevis für den gebogenen Nageltyp auf. Die Verriegelung im Bereich der Nagelspitze erscheint uns von medial ausgeführt sicherer, was eine mögliche Verletzung des N. fibularis superficialis et profundus und der A. tibialis anterior betrifft. Diese zeigten im Bereich des distalen Tibiaschaftes statistisch signifikante Vorteile für den gebogenen Nageltyp bezüglich des M. extensor digitorum longus, der A. tibialis anterior, des N. fibularis profundus und N. fibularis superficialis. Der gerade Nageltyp zeigte im Bereich des distalen Tibiaschaftes signifikant bessere Ergebnisse in Bezug auf die V. saphena magna. Die Auswertung der radiologischen Daten zeigte keine signifikanten Veränderungen in den Rückfußachsen, der ossären Führung im Calcaneus sowie keine relevante Varisierung. In Kenntnis der gefährdeten Strukturen kann ein angepasstes chirurgisches Vorgehen Komplikationen bei der TTCF mit dem retrograden Marknagel verringern.

8. Literatur- und Quellenverzeichnis

Adkison DP, Bosse MJ, Gaccione DR, Gabriel KR. 1991. Anatomical variations in the course of the superficial peroneal nerve. J Bone Joint Surg Am, 73: 112-114

Albert E. 1879. Zur Resektion des Kniegelenkes. Wien, Med Presse 22: 706–707

Allgöwer M, Huggler A. 1964. Zur Arthrodesse des Talo-Calcanearien-Gelenkes. Arch Orthop Unfall Chir 56: 496-500

Bauer G, Kinzl L. 1996. Arthrodesis of the ankle joint. Orthopade, 25: (2) 158-165

Bier A, Braun H, Kümmel H. 1917. Chirurgische Operationslehre. Leipzig: JA Barth

Blair JM, Botte MJ. 1994. Surgical anatomy of the superficial peroneal nerve in the ankle and foot. Clin Orthop Relat Res, 305: 229-238,

Charnley J. 1951. Compression arthrodesis of the ankle and shoulder. J Bone Joint Surg Br, 20: (1) 18-24

Chiodo CP, Acevedo JJ, Sammarco VJ, Parks BG, Boucher HR, Myerson MS, Schon LC. 2003. Intramedullary rod fixation compared with blade-plate-and-screw fixation for tibiotalocalcaneal arthrodesis: a biomechanical investigation. J Bone Joint Surg Am, 85-A: 2425-2428

Cramer K. 1910. Beitrag zur Arthrodesse des Talocruralgelenkes. Zentralbl Chir Mechan Orthop, 4: 113-116

Debrunner A M. 1994. Orthopädie, Orthopädische Chirurgie: Die Störungen des Bewegungsapparates in Klinik und Praxis. Dritte Aufl. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle: Hans Huber Verlag, 848-866

Flock TJ, Ishikawa S, Hecht PJ, Wapner KL. 1997. Heel anatomy for retrograde tibiototalcalcaneal roddings: a roentgenographic and anatomic analysis. Foot Ankle Int, 18: 233-235

Fuhrmann RA, Fröber R. 2010. Release of the lateral plantar nerve in case of entrapment. Oper Orthop Traumatol, 22: (3) 335 - 343

Goebel M, Gerdesmeyer L, Mückley T, Schmitt-Sody M, Diehl P, Stienstra J, Bühren V. 2006. Retrograde intramedullary nailing in tibiototalcalcaneal arthrodesis: a short-term, prospective study. J Foot Ankle Surg, 45: 98-106

Grass R. 2005. Die tibiototalcalcaneare Arthrodesse mit dem retrograd eingebrachten distalen Femurnagel (DFN). Oper Orthop Traumatol, 17: 426-441

Greifensteiner H. 1953. Compression arthrodesis of the knee. Z Orthop Ihre Grenzgeb, 83: (3) 406-414

Gschwend N, Steiger U. 1987. Staple fixation in hindfoot arthrodesis, a valuable procedure in the complex R A foot. Karger, Basel: Rheumatology, Bd 11, 88: 114-125

Hammett R, Hepple S, Forster B, Winson I. 2005. Tibiototalcalcaneal (hindfoot) arthrodesis by retrograde intramedullary nailing using a curved locking nail: The results of 52 procedures. Foot Ankle Int, 26: 810-815

Jerosch J, Heisel J. 2009. Operative Therapie von Fuß und Sprunggelenk. Erste Aufl. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag, 39-58

Jung S O. 2004. Funktioneller und radiologischer Vergleich von internen Arthrodesen des oberen Sprunggelenkes [Dissertation]. Bochum: Ruhr Universität

Kaessmann HJ. 1966. Stabile Osteosynthese durch den Kompressionsnagel. Chirurg, 37: 272-276

Kile TA, Donnelly RE, Gehrke JC, Werner ME, Johnson KA. 1994. Tibiototalcalcaneal arthrodesis with an intramedullary device. Foot Ankle Int, 15: 669-673

Küntsch G, Maatz R (Hrsg). 1945. Technik der Marknagelung. Leipzig: Thieme Verlag

von Lanz T, Wachsmuth W. 2004. Praktische Anatomie, Bein und Statik. Zweite Aufl 1972, Sonderausgabe Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 301-444

Maatz R, Lenz W, Arens W et al. 1983. Die Marknagelung und andere intramedulläre Osteosynthesen. Stuttgart, New York: Schattauer

Mann MR, Parks BG, Pak SS, Miller SD. 2001. Tibiotalocalcaneal arthrodesis: a biomechanical analysis of the rotational stability of the Biomet Ankle Arthrodesis Nail. Foot Ankle Int, 22: 731-733

McGarvey WC, Trevino SG, Baxter DE, Noble PC, Schon LC. 1998. Tibiotalocalcaneal arthrodesis: anatomic and technical considerations. Foot Ankle Int, 19: 363-369

McGarvey MC. 2006. Plantarer Fersenschmerz: Operative Therapie. In: Wülker N, Stephens M, Cracchiolo III A: Operationsatlas Fuß und Sprunggelenk. Zweite Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 171-174

Millett PJ, O'Malley MJ, Tolo ET, Gallina J, Fealy S, Helfet DL. 2002. Tibiotalocalcaneal fusion with a retrograde intramedullary nail: clinical and functional outcomes. Am J Orthop, 31: 531-536

Mittelmeier H, Hort W, Diehl K. 1975. Interne Kompressionsarthrodese des oberen Sprunggelenkes. Arch Orthop Unfall Chir, 81: 57-64

Mittelmeier H, Trennheuser M, Mittelmeier W. 1990. Vergleichende biomechanische Messungen der Torsionsstabilität von intramedullären Nagel-Osteosynthesen. Hefte Unfallheilkd, 212: 468–471

Moore TJ, Prince R, Pochatko D, Smith JW, Fleming S. 1995. Retrograde intramedullary nailing for ankle arthrodesis. Foot Ankle Int, 16: 433-436

Mückley T, Bühren V. 2004. T2 Kompressionsmarknagel. Trauma Berufskrankh 6: (3) 302-306

Mückley T, Hofmann G O. 2005. Arthrodesen mit intramedullären Kraftträgern. Trauma Berufskrankh 7: 107–111

Mückley T, Eichhorn S, Hoffmeier K, von Oldenburg G, Speitling A, Bühren V, Hofmann GO. 2006. Biomechanical evaluation of primary stiffness of tibiotalocalcaneal fusion with intramedullary nails. Foot Ankle Int, 16: 24-30

Noonan T, Pinzur M, Paxinos O, Havey R, Patwardhin A. 2005. Tibiotalocalcaneal arthrodesis with a retrograde intramedullary nail: a biomechanical analysis of the effect of nail length. Foot Ankle Int, 26: 304-308

Paar O, Klever P, Erli H-J. 2001. Gefäßversorgung der Achillessehne: Radiologische, mikroradiographische und histologische Untersuchungen The Achilles Tendon Blood Supply

- Radiological, Microradiographical and Histological Findings. In: Aktuelle Traumatologie. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag 31(6): 241 -244

Pochatko DJ, Smith JW, Phillips RA, Prince BD, Hedrick MR. 1995. Anatomic structures at risk: combined subtalar and ankle arthrodesis with a retrograde intramedullary rod. Foot Ankle Int, 16: 542-547

Quill GE. 1996. Tibiototalcalcaneal and pantalar arthrodesis. Foot Ankle Clin, 1: 199-210

Quill GE. 1999. The use of a second-generation intramedullary nail in the fixation of difficult ankle and hindfoot arthrodeses. Am J Orthop Supplement, 23-31

Ritter G. 1991. Kompressionsosteosynthese mit dem neuen AO-Universalnagel: Funktionsprinzip und biomechanische Voraussetzungen. Unfallchirurg 94: 9–12

Roberts CS, King D, Wang M, Seligson D, Voor MJ. 1999. Should distal interlocking of tibial nails be performed from a medial or a lateral direction? Anatomical and biomechanical considerations. J Orthop Trauma, 13: 27-32

Schneider D. 1983. Arthroscopic ankle fusion, a case report. Annual AANA Meeting. New Orleans

Stahl C, Maaz B. 1990. Die Arthrodesen an der unteren Extremität. Landsberg/Lech: ecomed, 101-138

Stephenson KA, Kile TA, Graves SC. 1996. Estimating the insertion site during retrograde intramedullary tibiotalocalcaneal arthrodesis. Foot Ankle Int, 17: 781-782

Thomann KD. 1994. Die künstliche Gelenkversteifung: Zur Geschichte eines therapeutischen Verfahrens. In: Stuhler T (Hrsg.) Arthrodesen. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag

Urban WP Jr, Tornetta P 3rd. 1995. Vascular compromise after intramedullary nailing of the tibia: a case report. J Trauma, 38: 804-807

Van der Elst M, Van der Werken C. 2005. Fasziotomien zur Behandlung von Kompartmentsyndromen am Unterschenkel. In: Duparc J. Chirurgische Techniken in Orthopädie und Traumatologie. Erste Aufl. München: Urban & Fischer Verlag, 947-953

Wagner H, Pock HG. 1982. Die Verschraubungsarthrodese der Sprunggelenke. Unfallheilkunde, 85: 280-300

Wagner H, Wagner M. 2005. Arthrodese des Sprunggelenkes mit interner Fixation. In: Duparc J. Chirurgische Techniken in Orthopädie und Traumatologie. Erste Aufl. München: Urban & Fischer Verlag, 1043-1049

Waldeyer A, Mayet A. 1993. Anatomie des Menschen. 16te Aufl. Berlin; New York: de Gruyter Verlag, 435-438, 449-498, 515-528

Williamson DM, Kershaw CJ. 1989. Serious vascular complication of locked tibial nailing. Injury, 20(5):310-312

Zimmermann H. 1973. Die Schraubenarthrodese des oberen Sprunggelenkes. Orthop Prax, 10: 426

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der
Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel,
persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der
Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Herr Prof. Dr. med. Thomas Mückley,
Frau OÄ Dr. med. Rosemarie Fröber,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde

und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten
erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere
wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei
einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Torgau, 08.04.2013

Sebastian Andreas Ullm

Danksagung

Mein inniger Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben.

Meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Thomas Mückley, bin ich zu ganz besonderem Dank verpflichtet. Er ermöglichte mir tiefe Einblicke in dieses sehr spezifische Teilgebiet der Unfallchirurgie und stand mir stets mit Rat und Tat, Lob und Kritik, und natürlich seinem umfangreichen Fachwissen helfend zur Seite.

Ferner danke ich meiner verehrten Oberärztin, Frau Dr. med. Rosemarie Fröber, für die konstruktive Betreuung im Gebiet der Anatomie, den anregenden Diskussionen und der kritischen Korrektur des Manuskriptes.

Weiterhin danke ich Frau C. Beimel für die statistische Auswertung aller Daten und Herrn Oberarzt A. Petrovitch für die radiologische Auswertung der CT Bilder.

Danken möchte ich den Mitarbeitern des Instituts für Anatomie I, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Den Mitarbeitern der Prosektur, insbesondere Frau Simone Freund, für Ihr persönliches Engagement während der Versuche und im Umgang mit den Präparaten. Herr Konrad Hoffmeier stand mir bei der Versuchsauswertung mit Rat und Tat zur Seite. Die ausgezeichneten Fotografien verdanke ich Herrn Szabo.

Vielen Dank meiner ganzen Familie, meinen Freunden und allen Beteiligten für Ihre aufmunternden Worte und Hilfe.

Abbildungsnachweis

Abbildungen 1-4: aus Lanz und Wachsmuth 2004

Abbildungen 5, 7 bis 15: aus Jerosch und Heisel 2009

Abbildungen 6, 16, 22 bis 24: aus der Stryker Broschüre „Ankle Arthrodesis Nailing System“

Stryker Trauma GmbH, Prof.-Küntscher-Straße 1–5, D - 24232

Schönkirchen, Germany, www.osteosynthesis.stryker.com

Abbildungen 17 bis 21: Intraoperative Bildverstärkeraufnahmen vom 15.04.2007

Abbildungen 25 bis 43: Postoperative Bilder nach Präparation der anatomischen Strukturen.